



Sveučilište u Zagrebu

Kineziološki fakultet

Saša Rodić

**UTJECAJ UMORA NA PROMJENE U
KINEMATIČKIM PARAMETRIMA TIJEKOM
IZVEDBE SKOK ŠUTA U RUKOMETU**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

prof. emer. dr. sc. Branka Matković

izv. prof. dr. sc. Katarina Ohnjec

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Kinesiology

Saša Rodić

**INFLUENCE OF FATIGUE ON CHANGES IN
CERTAIN KINEMATIC PARAMETERS
DURING THE PERFORMANCE OF A JUMP
SHOT IN HANDBALL**

DOCTORAL THESIS

Mentors:

prof. Branka Matković, PhD, Professor Emeritus

Katarina Ohnjec, PhD, Associate Professor

Zagreb, 2026.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
SAŽETAK	VI
1. UVOD	1
1.1. <i>Struktura i zahtjevi rukometne igre</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Tehničke i taktičke komponente igre</i>	<i>1</i>
1.3. <i>Fiziološki zahtjevi i mehanizmi umora</i>	<i>4</i>
1.4. <i>Skok šut – biomehanička struktura i kinematička analiza</i>	<i>8</i>
1.5. <i>Utjecaj umora na kinematiku skok šuta i istraživačka praznina</i>	<i>14</i>
2. CILJ I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA	20
3. METODE RADA	21
3.1. <i>Uzorak ispitanika</i>	<i>21</i>
3.2. <i>Uzorak varijabli</i>	<i>22</i>
3.3. <i>Mjerni instrumenti</i>	<i>34</i>
3.4. <i>Protokol mjerenja</i>	<i>47</i>
3.5. <i>Metode obrade podataka</i>	<i>53</i>
3.6. <i>Etika i kontrola varijabli</i>	<i>55</i>
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA	56
5. RASPRAVA	84
6. ZAKLJUČAK	115
LITERATURA	118
POPIS TABLICA	133
POPIS SLIKA	135
ŽIVOTOPIS	137

Zahvale

Izrada ove doktorske disertacije predstavljala je višegodišnji i zahtjevan proces tijekom kojega su stručna pomoć, podrška i razumijevanje brojnih osoba imali iznimnu važnost. Stoga ovim putem izražavam iskrenu zahvalnost svima koji su svojim znanjem, savjetima i podrškom pridonijeli nastanku ovoga rada.

Posebnu zahvalnost upućujem svojim mentoricama, prof. emer. dr. sc. Branki Matković i izv. prof. dr. sc. Katarini Ohnjec, na ukazanom povjerenju, stručnom vodstvu, vrijednim sugestijama i kontinuiranoj podršci tijekom svih faza izrade disertacije. Njihovo znanje, iskustvo i akademska predanost bili su važan oslonac u oblikovanju ovoga rada te u mom znanstvenom i stručnom razvoju.

Posebno zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Tomislavu Rupčiću na ideji, stručnim savjetima i pomoći tijekom oblikovanja istraživačkog pristupa i samoga rada. Njegovi prijedlozi i promišljanja bili su vrijedan doprinos u usmjeravanju i razradi ove disertacije.

Zahvaljujem članovima povjerenstva, izv. prof. dr. sc. Davoru Šentiji, izv. prof. dr. sc. Tomislavu Rupčiću i prof. dr. Marku Šibili, na vremenu koje su posvetili ocjeni rada te na konstruktivnim primjedbama, prijedlozima i stručnim komentarima koji su pridonijeli njegovoj konačnoj kvaliteti.

Iskrenu zahvalnost upućujem i kolegama iz Laboratorija za sportske igre na suradnji, pomoći i poticajnom akademskom okruženju. Zajednički rad, razmjena znanja i stručne rasprave tijekom ovog procesa bili su vrijedan doprinos provedbi i dovršetku mog istraživanja. Posebnu zahvalnost upućujem svojim najbližim suradnicima iz aktiva TZK SŠJ na kontinuiranoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog procesa.

Zahvaljujem svojim roditeljima što su mi usadili upornost, a od srca zahvaljujem svojoj supruzi Kristini na strpljenju, razumijevanju i trajnoj podršci tijekom svih izazova koje je donio proces izrade doktorske disertacije. Njezina prisutnost i oslonac imali su za mene neprocjenjivu vrijednost.

Na kraju, ovaj rad s posebnom ljubavlju posvećujem svojoj kćeri Viti, čija su radost i prisutnost bile trajna inspiracija i najdublji poticaj tijekom ovoga puta.

Informacije o mentorima

Branka Matković, rođ. Jeričević, rođena je 30.05.1953. godine u Borovu. Po narodnosti je Hrvatica i hrvatska državljanica. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Zagrebu s odličnim uspjehom. Godine 1971. upisala je studij medicine na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a 1977. godine je na istom fakultetu diplomirala. Obavezni liječnički staž obavila je u kliničkoj bolnici "Sestre milosrdnice" u Zagrebu. Stručni ispit položila je 25.04.1979. godine pri Republičkom komitetu za zdravstvenu i socijalnu zaštitu u Zagrebu.

Na Medicinskom fakultetu u Zagrebu upisala je 1978. poslijediplomski studij iz Sportske medicine te 1983. obranila magistarski rad pod naslovom "Normativne vrijednosti aerobnog kapaciteta i respiracijskih funkcija učenika starih 15 godina". Doktorski rad pod naslovom "Relacije aerobnog kapaciteta i morfoloških karakteristika u djece" obranila je 1990. na Medicinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od 1.07.1979. radi na Fakultetu za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu, najprije kao pripravnik na Katedri za kineziološku fiziologiju i patologiju gdje sudjeluje u izvođenju vježbi iz kineziološke fiziologije, sportske medicine i biološke antropologije. Od 1.10.1980. asistent je na predmetu Kineziološka fiziologija te vodi vježbe na redovnom studiju FFK i na poslijediplomskim studijima Medicine rada i Sportske medicine Medicinskog fakulteta u Zagrebu te poslijediplomskom studiju Šumarskog fakulteta u Zagrebu.

U zvanje znanstvenog suradnika za područje medicine izabrana je 1992. godine, u zvanje višeg znanstvenog suradnika 2003. godine, a u zvanje znanstvenog savjetnika 2009. godine. U veljači 1997. godine izabrana je za docenta na predmetu Kineziološka fiziologija, 2003. godine za izvanrednog profesora na istom predmetu, 2009. godine na predmetu Fiziologija sporta i vježbanja u redovitog profesora. U redovitoga profesora u trajnom zvanju, u području Biomedicine i zdravstva, polje Temeljne medicinske znanosti, grana Fiziologija čovjeka izabrana je 29. listopada 2015. godine.

Od 2000. godine voditelj je predmeta Fiziologija sporta i vježbanja, kojega je i kreirala, u okviru redovitih i izvanrednih studija, od 2001. i predmeta Dijagnostika u sportu na doktorskom studiju Kineziološkog fakulteta, a 2008. uvodi novi izborni predmet Fiziologija sporta u ekstremnim uvjetima. Sudjeluje i u nastavi u okviru izbornog predmeta Sportska medicina na Medicinskom fakultetu u Zagrebu te u

nastavi poslijediplomskih specijalističkih studija istog fakulteta (Fizikalna medicina i rehabilitacija, Medicina rada i sporta na kojem studiju je nositelj predmeta Fiziologija rada i sporta). Autor je programa predmeta Antropologija sporta na diplomskom studiju Fakulteta fizičkog vaspitanja i sporta, studijski smjer – Sport (Banja Luka, BiH), 2011. godine te je sljedeće tri godine bila i gostujući predavač, odnosno nositelj predmeta na navedenom fakultetu.

Na doktorskom studiju Kineziologija, u čijem je pokretanju sudjelovala, aktualna je nositeljica modula Biomedicina sporta i vježbanja te predmeta Objektivni pokazatelji oštećenja mišića, umora i pretreniranosti, kao i suradnik na predmetu Mjerni instrumenti u eksperimentalnoj kineziologiji. Bila je mentor 12 magistarskih i 14 doktorskih radova.

Od 1997. do 2001. godine obavljala je dužnost zamjenika predstojnika Zavoda za kineziološku antropologiju, a od 1.10.2001. u dva mandata bila je prodekanica za znanstveni rad Kineziološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Od 1.10.2005. bila je predstojnica Zavoda za Kineziološku antropologiju i metodologiju Kineziološkog fakulteta u dva mandata. Bila je predstojnica Katedre za medicinu sporta i vježbanja od 2010. godine do 2024. Od 1.10.2013. bila je savjetnica dekana Kineziološkog fakulteta za nastavu i studente, do 2022.

2024. godine izabrana je u zvanje prof. emerita Sveučilišta u Zagrebu.

Katarina Ohnjec rođena je 17. svibnja 1976. godine u Zagrebu. Aktivno se bavila rukometom kroz sve uzrasne kategorije, sve do seniorske profesionalne razine. Od 2004. godine članica je reprezentacije Hrvatske u rukometu na pijesku. Osnovno i srednje obrazovanje završila je u Zagrebu. Nakon završetka studija i magisterija, 8. svibnja 2012. godine obranila je doktorsku disertaciju pod naslovom „Vrednovanje različitih vrsta napada u rukometnoj igri temeljem njihova početka, ishoda, trajanja i broja dodavanja” (mentori: prof. dr. sc. Dinko Vuleta i prof. dr. sc. Dražan Dizdar), čime je stekla akademski stupanj doktorice znanosti iz područja društvenih znanosti, polja odgojnih znanosti, grane kineziologije.

Na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu zaposlena je od 2005. godine kao asistentica na predmetu Rukomet. Od 2016. godine izabrana je u znanstveno-nastavno zvanje docentice, a od 2023. godine u zvanje izvanredne profesorice. U okviru sveučilišnog studija sudjeluje u izvođenju nastave na obveznom predmetu Rukomet te na predmetima izbornog modula Rukomet. Od akademske godine 2017./2018. uključena je i u nastavu izbornog predmeta Rukomet na pijesku, čiji je nositelj od akademske godine 2018./2019.

U razdoblju od 2007. do 2013. godine sudjelovala je kao suradnica na znanstveno-istraživačkom projektu „Dijagnostički postupci za utvrđivanje stanja treniranosti u rukometu” pod vodstvom prof. dr. sc. Dinka Vulete. Također je suradnica na projektu Europske komisije Erasmus+ „Equal Opportunities for Women in Handball” (nositelj: Rukometni savez Zagrebačke županije), a od 2026. godine uključena je i u institucionalni istraživački projekt „Prava djece u sportu i tjelesnoj i zdravstvenoj kulturi – poticanje kompetencija za demokratske kulture (DIREKT)”.

Tijekom rada na Kineziološkom fakultetu obnašala je dužnost pomoćnice voditelja stručnih studija te je stalna članica više povjerenstava. U svom znanstvenom i stručnom radu objavila je nešto više od 100 radova, pri čemu pokazuje širok istraživački interes unutar kineziologije, s posebnim naglaskom na rukomet. Aktivno sudjeluje na brojnim domaćim i međunarodnim znanstvenim i stručnim skupovima, gdje redovito izlaže i održava predavanja. Dobitnica je više nagrada i priznanja za uspješan i dugogodišnji rad.

SAŽETAK

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi utječe li razina fiziološkog opterećenja na promjene u odabranim kinematičkim parametrima izvođenja skok šuta u rukometu. Uzorak ispitanika činilo je 20 rukometaša koji nastupaju u hrvatskoj Premier i 1. ligi. Mjerenje je provedeno u standardiziranim uvjetima, na istom terenu i uz korištenje specifičnog protokola za induciranje fiziološkog umora. Uzorak varijabli obuhvatio je morfološke karakteristike ispitanika te skup kinematičkih i fizioloških pokazatelja povezanih s izvedbom skok šuta. Analizirane su kinematičke varijable donjih i gornjih ekstremiteta (maksimalne kutne brzine u zglobovima gležnja, koljena, kuka, ramena, lakta i ručnog zgloba, linearne brzine segmenata natkoljenice, potkoljenice, ramena, nadlaktice, podlaktice i šake, maksimalna visina šake, visina i duljina skoka, maksimalni kutovi u zglobov koljena i kuka), zatim maksimalna brzina lopte nakon izbačaja, trajanje kontakta odrazne noge s podlogom, preciznost šuta, frekvencija srca, koncentracija laktata i subjektivni osjećaj umora.

Sukladno cilju istraživanja postavljeno je pet hipoteza kojima se pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u promatranim kinematičkim parametrima gornjeg i donjeg dijela kinematičkog lanca, brzini izbačaja lopte, trajanju kontakta odrazne noge s podlogom te preciznosti šuta prije i nakon fiziološkog opterećenja. Za potrebe istraživanja korišteni su sljedeći instrumenti: *Xsens MVN* sustav za kinematičku analizu, *Optojump Next* sustav za mjerenje kontakta s podlogom, *Polar H10* za mjerenje frekvencije srca, *Lactate Scout 3* za mjerenje koncentracije laktata, *Stalker ATS II* radar za mjerenje brzine lopte, *high speed* kamera Panasonic GH5 (180 fps) za snimanje izvedbe šuta, *Kinovea softver* za video analizu preciznosti šuta te Borgova skala za subjektivnu procjenu umora.

Fiziološko opterećenje inducirano je specifičnim rukometnim protokolom visokog intenziteta. Ispitanici su izvodili serije skok šutova na gol prije i nakon opterećenja, uz istodobno bilježenje kinematičkih i fizioloških parametara. Dobiveni podatci obrađeni su odgovarajućim statističkim metodama za ponovljena mjerenja, s ciljem utvrđivanja razlika u promatranim varijablama između inicijalnog i završnog stanja te provjere postavljenih hipoteza.

Rezultati su pokazali da fiziološko opterećenje dovodi do statistički značajnih promjena u nizu kinematičkih i izvedbenih parametara skok šuta u rukometu, pri čemu

se učinci umora očituju na razini gornjeg i donjeg dijela kinematičkog lanca, brzine lopte, trajanja kontakta s podlogom te preciznosti izvedbe. U skladu s time, uočeno je smanjenje maksimalnih kutnih brzina u pojedinim zglobovima donjih ekstremiteta (gležanj, koljeno, kuk) te promjene u trajanju kontakta odrazne noge s podlogom, što upućuje na modificiranu tehniku odraza i faze leta pod utjecajem umora. Također su zabilježene promjene u maksimalnim brzinama segmenata gornjeg ekstremiteta (ramena, nadlaktice, podlaktice i šake) te u maksimalnim kutnim brzinama ramena, lakta i ručnog zgloba, što se odražava na dinamiku prijenosa impulsa kroz kinematički lanac i završnu fazu izbačaja lopte. Maksimalna brzina lopte nakon izbačaja smanjila se u stanju povišenog fiziološkog opterećenja, uz istodobno povećanje vrijednosti frekvencije srca, koncentracije laktata i subjektivnog osjećaja umora, što je u skladu s nalazima prethodnih istraživanja koja potvrđuju da su visoke razine laktata i opterećenja povezane sa smanjenjem brzine šuta i promjenama u kinematičkim obrascima. Preciznost šuta, izražena odstupanjem pogodaka od ciljanog mjesta, pokazala je paradoksalno poboljšanje na skupnoj razini pod utjecajem umora – prosječno odstupanje od ciljane točke smanjilo se za 17,8 %. Taj nalaz tumači se kompromisnim odnosom između brzine i preciznosti bacačkog gibanja: smanjenje brzine lopte pod opterećenjem praćeno je povećanom pažnjom prema preciznosti i kontroliranijom tehničkom izvedbom. Međutim, izrazita interindividualna varijabilnost upućuje na to da skupna vrijednost ne opisuje adekvatno individualne obrasce – dio ispitanika bilježi pogoršanje, a dio poboljšanje preciznosti – što ukazuje na individualno specifične strategije prilagodbe šuterske tehnike u uvjetima visokog fiziološkog opterećenja.

Ukupno gledano, rezultati potvrđuju da fiziološki umor mijenja biomehanički obrazac izvedbe skok šuta i negativno utječe na brzinu lopte, uz selektivne promjene u kinematičkim parametrima gornjeg i donjeg dijela kinetičkog lanca. Učinak umora na preciznost šuta pokazao se složenijim od očekivanog, pri čemu skupna analiza ukazuje na paradoksalno poboljšanje preciznosti koje se interpretira kao posljedica kompromisa između brzine i preciznosti bacačkog gibanja. Navedeni nalazi naglašavaju važnost razvoja otpornosti na umor i očuvanja tehničke stabilnosti šuta u uvjetima natjecateljskog opterećenja.

Ključne riječi: rukomet, kinematika, fiziološki umor, skok šut u rukometu

Abstract

INFLUENCE OF FATIGUE ON CHANGES IN CERTAIN KINEMATIC PARAMETERS DURING THE PERFORMANCE OF A JUMP SHOT IN HANDBALL

This research aimed to determine whether physiological load affects changes in selected kinematic parameters of the jump shot in handball. The sample consisted of 20 elite male handball players competing in the Croatian Premier League and First League. Measurements were conducted under standardized conditions, on the same court, and using a specific protocol to induce physiological fatigue. The variables included morphological characteristics of the participants, as well as a set of kinematic indicators and a set of physiological indicators related to jump-shot performance.

Lower and upper extremity kinematic parameters were analyzed (maximum angular velocities in the ankle, knee, hip, shoulder, elbow, and wrist joints; linear velocities of the thigh, shank, shoulder, upper arm, forearm, and hand segments; maximum hand height; jump height and length; and maximum knee and hip joint angles). In addition, the maximum ball velocity, the take-off foot contact duration, shooting accuracy, heart rate, blood lactate concentration, and perceived exertion were measured. In accordance with the research aim, five hypotheses were formulated, assuming statistically significant differences in selected kinematic parameters of the upper and lower extremities, ball release velocity, foot contact time, and shooting accuracy before and after physiological loading. The following instruments were used: the *Xsens MVN* system for kinematic analysis, the *Optojump Next* system for measuring ground contact, the *Polar H10* for heart rate monitoring, the *Lactate Scout 3* for lactate concentration measurement, the *Stalker ATS II* radar for ball velocity assessment, the *Panasonic GH5* high-speed camera (180 fps) for recording shot execution, the *Kinovea* software for video-based shooting accuracy analysis, and the Borg scale for subjective fatigue evaluation. Physiological loading was induced using a specific high-intensity handball protocol. Participants performed a series of jump shots at the goal before and after loading, while kinematic and physiological parameters were recorded simultaneously.

Collected data were processed using appropriate statistical methods for repeated measures to determine differences in the studied variables between the initial and final states and to test the stated hypotheses. The results showed that physiological loading led to statistically significant changes in several kinematic and performance

parameters of the handball jump shot. Fatigue effects were evident in both the upper and lower parts of the kinematic chain, as well as in ball velocity, contact duration, and shooting accuracy. A decrease in maximum angular velocities was observed in certain lower-limb joints (ankle, knee, hip), along with changes of the take-off leg contact time, indicating modified mechanics of push-off and flight phases under fatigue.

Additionally, changes were recorded in the maximum velocities of upper-limb segments (shoulder, upper arm, forearm, and hand) and in the maximum angular velocities of the shoulder, elbow, and wrist joints, which affected impulse transfer dynamics through the kinematic chain and the final release phase of the shot. The maximum ball velocity decreased under elevated physiological load, accompanied by increased heart rate, blood lactate values, and perceived exertion. These findings align with previous studies indicating that elevated lactate levels and fatigue are related to shooting velocity and altered kinematic patterns. Shooting accuracy, expressed as the deviation of hits from the target, showed a paradoxical improvement at the group level under fatigue – the average deviation from the target point decreased by 17.8 %. This finding is interpreted as a consequence of the speed-accuracy trade-off in throwing performance: the reduction in ball velocity under fatigue was accompanied by greater attentional focus on precision and more controlled technical execution. However, the pronounced interindividual variability indicates that the group mean does not adequately represent individual response patterns – some participants showed a deterioration in accuracy, while others demonstrated improvement – suggesting individually specific individual jump shot modifications under conditions of high physiological load.

Overall, the results confirm that physiological fatigue alters the biomechanical pattern of the handball jump shot and negatively affects ball velocity, with selective changes in kinematic parameters of both the upper and lower parts of the kinetic chain. The effect of fatigue on shooting accuracy proved more complex than expected, with group-level analysis revealing a paradoxical improvement in accuracy interpreted as a consequence of the speed-accuracy trade-off in throwing performance. These findings emphasize the importance of developing fatigue resistance and maintaining technical stability of shooting consistency under competitive stress.

Keywords: *handball, kinematics, physiological fatigue, handball jump sho*

1. UVOD

1.1. *Struktura i zahtjevi rukometne igre*

Rukomet je danas prepoznat kao jedan od najdinamičnijih i najzahtjevnijih momčadskih sportova, obilježen visokom frekvencijom sprintova, skokova, promjena smjera i snažnih tjelesnih kontakata. Tijekom igre zahtijeva složenu i višerazinsku interakciju tehničkih, taktičkih i fizioloških komponenti, koje zajedno determiniraju ukupnu učinkovitost izvedbe u natjecateljskim uvjetima. Upravo ta međusobna povezanost različitih dimenzija izvedbe predstavlja temelj za razumijevanje složenosti rukometne igre kao integriranog sustava.

Temeljna karakteristika rukometa kao izrazito dinamičnog sporta očituje se u integraciji brzine, snage, koordinacije i taktičke inteligencije, dok rukometni šut, kao jedna od ključnih završnih aktivnosti, zahtijeva visoku razinu eksplozivne snage, preciznosti te optimalnu biomehaničku sinkronizaciju između donjih i gornjih ekstremiteta. U tom smislu, šut se može promatrati kao konačni izraz uspješnosti prethodno realiziranih tehničko-taktičkih aktivnosti. Specifičnost rukometne igre dodatno se ogleda u visokoj učestalosti aktivnosti visokog intenziteta, poput sprintova, skokova i šutova, koje se izvode u kratkim vremenskim intervalima i pod varijabilnim situacijskim uvjetima. Takva struktura igre čini rukometaše posebno osjetljivima na kumulativne učinke umora, što se posljedično odražava na kvalitetu tehničke izvedbe te povećava rizik od ozljeda, pri čemu se u rukometu, slično kao u košarci i odbojci, najčešće bilježe ozljede donjih ekstremiteta (Milić i sur., 2025). Slijedom navedenoga, analiza biomehaničkih i fizioloških parametara šuta nameće se kao ključan čimbenik u optimizaciji trenažnog procesa i unapređenju natjecateljske učinkovitosti (Khalifa i sur., 2025).

1.2. *Tehničke i taktičke komponente igre*

U okviru opće strukture rukometne izvedbe, tehnička komponenta predstavlja temeljnu operativnu razinu realizacije igre. Tehnička komponenta rukometa obuhvaća skup specifičnih motoričkih vještina koje omogućuju učinkovitu realizaciju osnovnih elemenata igre, uključujući dodavanje, hvatanje, vođenje lopte, fintiranje, blokiranje te različite vrste šutova (Rogulj i sur., 2004). U suvremenom rukometu tehnička izvedba

mora biti visoko automatizirana, biomehanički učinkovita i funkcionalno prilagodljiva situacijskim zahtjevima igre, budući da se većina tehničkih elemenata izvodi u uvjetima visoke brzine kretanja, ograničenog vremena za reakciju i čestog kontakta s protivničkim igračima (Wagner i sur., 2014).

Kako bi se preciznije razumjeli zahtjevi koji se postavljaju pred tehničku izvedbu, nužno je analizirati strukturu kretanja i aktivnosti koje igrači kontinuirano izvode tijekom utakmice. Tehnički zahtjevi rukometne igre mogu se najcjelovitije razumjeti analizom strukture kretanja koju igrači kontinuirano izvode tijekom utakmice, pri čemu se izmjenjuju aktivnosti s loptom i bez lopte u napadačkim i obrambenim situacijama. Suvremeni rukomet karakterizira kontinuirano povećanje dinamike i intenziteta igre, uz istodobno povećanje razine kontakta među igračima tijekom natjecateljskih aktivnosti. Takvi uvjeti značajno reduciraju vrijeme koje igrači imaju na raspolaganju za donošenje odluka i provedbu motoričkih zadataka, čime se dodatno povećavaju zahtjevi za učinkovitim upravljanjem motoričkim i kognitivnim procesima.

Iz navedenih zahtjeva proizlazi potreba za visokom razinom automatizacije tehničkih elemenata. Sukladno tomu, temeljni tehnički elementi moraju biti usvojeni i automatizirani do razine koja igraču omogućuje brzo, precizno i učinkovito reagiranje u različitim situacijskim uvjetima igre. Drugim riječima, uspješna izvedba tehničko-taktičkih aktivnosti u rukometu u velikoj mjeri ovisi o sposobnosti igrača da na situacijske podražaje reagira gotovo refleksno, bez potrebe za opsežnim i vremenski zahtjevnim kognitivnim procesiranjem. Upravo zahtjevi suvremene rukometne igre stoga impliciraju nužnost visoke razine automatizacije tehničko-taktičkih rješenja u specifičnim situacijskim uvjetima igre (Milanović i sur., 2018; Bojić-Ćaćić, 2020; Mohorić i sur., 2021; Hinz i sur., 2022).

Nadalje, razmatranje tehničke komponente nije potpuno bez uvažavanja njezine funkcionalne povezanosti s taktičkom učinkovitošću. U kontekstu vrhunskog rukometa tehnički zahtjevi ne odnose se isključivo na estetski „čistu” izvedbu pojedinih elemenata igre, već primarno na njihovu situacijsku učinkovitost i funkcionalnu primjenjivost u natjecateljskim uvjetima. Od igrača se stoga očekuje sposobnost donošenja optimalnih odluka u uvjetima visokog natjecateljskog tempa, pod kontinuiranim pritiskom obrambenih igrača i u stanju progresivnog umora, uz istodobno očuvanje visoke razine preciznosti i pravodobnosti u realizaciji šuta ili dodavanja.

U skladu s navedenim, evaluacija tehničke komponente nužno uključuje analizu specifičnih pokazatelja uspješnosti. U tom su kontekstu posebno relevantni tehničko-

taktički pokazatelji uspješnosti, kao što su šuterska učinkovitost s različitih pozicija i u različitim vrstama napada, broj asistencija, broj osvojenih lopti, uspješnost tranzicije te kvaliteta donošenja odluka u specifičnim situacijskim uvjetima igre. Navedeni pokazatelji često predstavljaju ključne diferencijacijske čimbenike između uspješnijih i manje uspješnih momčadi, kao i između pojedinih igrača unutar natjecateljskog sustava (Foretić i sur., 2010; Meletakos i sur., 2025; Krawczyk i sur., 2025; Burger i sur., 2026).

Konačno, proces usvajanja i stabilizacije tehničkih obrazaca dodatno objašnjava njihovu ulogu u cjelokupnoj izvedbi. Ohnjec i sur. (2021) dodatno naglašavaju postupnu automatizaciju motoričkih obrazaca kao ključan proces u usvajanju tehničkih elemenata rukometne igre, pri čemu ponavljanja u kontekstualiziranim i situacijski relevantnim uvjetima rezultiraju bržom, ekonomičnijom i stabilnijom izvedbom. Takva razina automatizacije omogućuje oslobađanje kognitivnih resursa nužnih za kvalitetnu percepciju igre, anticipaciju protivničkih i suigračkih akcija te donošenje optimalnih taktičkih odluka, čime tehnička izvedba postaje u potpunosti funkcionalno integrirana u zahtjeve natjecateljskog konteksta.

U nastavku razmatranja strukture izvedbe rukometne igre, taktička komponenta predstavlja višu razinu organizacije ponašanja igrača u specifičnim situacijskim uvjetima. Taktička učinkovitost rukometnih ekipa u napadu, mjerena uspješnošću šutova s različitih pozicija, broj asistencija i realizaciju kaznenih udaraca, izravno određuje ishod utakmice (Ohnjec i sur., 2008). Ona uključuje individualne, grupne i kolektivne taktičke aktivnosti koje se temelje na percepciji situacije u igri, anticipaciji kretanja suigrača i protivnika te izboru optimalnog rješenja u vrlo kratkom vremenskom intervalu (Rogulj i sur., 2004).

Kako bi se ostvarila taktička učinkovitost u napadačkim fazama igre, nužna je koordinirana primjena različitih taktičkih sredstava i obrazaca kretanja. U napadu taktičke aktivnosti uključuju različite sustave igre, kretanja bez lopte, blokade i križanja, kojima se nastoji destabilizirati obrambeni sustav protivnika i stvoriti povoljna situacija za šut. S druge strane, obrambena taktika usmjerena je na smanjenje raspoloživog prostora i vremena za realizaciju napada, čime se protivnika prisiljava na tehnički i biomehanički nepovoljne uvjete za izvođenje šuta (van den Tillaar i sur., 2023). Tako obrambene i napadačke aktivnosti čine međusobno ovisan i dinamičan sustav prilagodbi unutar igre.

U skladu s razvojem suvremenog rukometa, taktička učinkovitost sve se snažnije uvjetuje razinom kognitivnih sposobnosti igrača, poput brzine percepcije, selektivne pažnje i anticipacije, zato što se se situacije u igri kontinuirano i vrlo brzo mijenjaju te zahtijevaju trenutačnu prilagodbu motoričkih i tehničkih rješenja (Wagner i sur., 2014). Uz kognitivne sposobnosti, i emocionalna stanja pokazuju se značajno povezanim s izvedbom u elitnom rukometu, pri čemu pozitivne emocije prate bolju subjektivnu i objektivnu izvedbu, a negativne emocije slabiju (Moen i sur., 2018).

Slijedom navedenoga, taktički aspekti suvremenog rukometa oblikovani su trajnim ubrzanjem igre, povećanom učestalošću visokointenzivnih aktivnosti i rastućom kompleksnošću situacija u kojima se donose odluke. U takvom kontekstu taktika više ne predstavlja isključivo unaprijed definirani skup akcija, već dinamičan sustav odnosa između perceptivno-kognitivnih procesa i automatiziranih motoričkih obrazaca. Upravo ta integracija omogućuje brzo, situacijski primjereno i učinkovito ponašanje igrača u vremenski ograničenim i promjenjivim uvjetima igre, čime se taktička komponenta neposredno povezuje s tehničkom izvedbom i ukupnom učinkovitošću natjecateljske izvedbe.

1.3. Fiziološki zahtjevi i mehanizmi umora

U okviru cjelovite analize rukometne izvedbe, fiziološka komponenta predstavlja temeljnu biološku osnovu koja omogućuje realizaciju tehničkih i taktičkih zahtjeva igre. Fiziološka komponenta rukometa odnosi se na sposobnost organizma da se prilagodi visokim energetske i neuromuskularnim zahtjevima igre, koji uključuju ponavljajuće sprintove, eksplozivne skokove, promjene smjera kretanja i snažne pokrete bacanja lopte (Póvoas i sur., 2012). Tijekom utakmice rukometaši su izloženi progresivnom fiziološkom opterećenju koje dovodi do pojave perifernog i centralnog umora, što može utjecati na biomehaničku učinkovitost pokreta, koordinaciju i preciznost motoričke kontrole (Enoka i Duchateau, 2008).

Posljedično, fiziološki umor može uzrokovati promjene u kinematičkim parametrima izvođenja pokreta, poput smanjenja kutnih brzina zglobova, promjena u vremenu kontakta s podlogom odrazne noge ili smanjenja brzine lopte prilikom šuta (Plummer i Oliver, 2016; Garcés-Leal i sur., 2016). Upravo u tom kontekstu razumijevanje fizioloških mehanizama umora i njihove povezanosti s biomehaničkom izvedbom ima posebno značenje, osobito pri analizi kompleksnih motoričkih zadataka

poput skok šuta, gdje visoka razina eksplozivne snage, koordinacije i preciznosti mora biti očuvana i u uvjetima značajnog fiziološkog opterećenja karakterističnog za natjecateljski rukomet (Póvoas i sur., 2012; Wagner i sur., 2014).

Kako bi se cjelovitije razumjela priroda fizioloških zahtjeva rukometne igre, potrebno je sagledati strukturu aktivnosti koje dominiraju tijekom natjecanja. Rukometna igra uključuje česte sprintove, promjene smjera kretanja, skokove, kontaktne situacije i snažne pokrete izbačaja lopte, što zahtijeva visoku razinu funkcionalne pripremljenosti sportaša (Michalsik i Aagaard, 2015; Póvoas i sur., 2012; García-Sánchez i sur., 2023). Analize fizioloških zahtjeva rukometne igre pokazuju da vrhunski igrači tijekom utakmice postižu visoke vrijednosti srčane frekvencije, koje se prosječno kreću oko 80 – 85 % maksimalne frekvencije srca, što ukazuje na značajno opterećenje kardiovaskularnog sustava (Michalsik i Aagaard, 2015).

Uz to, zabilježene vrijednosti potrošnje kisika upućuju na izražen angažman aerobnog energetskeg sustava, koji omogućuje održavanje aktivnosti tijekom cijelog trajanja utakmice te ubrzava oporavak između visokointenzivnih akcija (Póvoas i sur., 2012). Istodobno, zbog čestih eksplozivnih aktivnosti kratkog trajanja, posebno značajnu ulogu ima anaerobni energetski sustav, tj. fosfageni i glikolitički mehanizmi, koji omogućuju generiranje velike količine energije u kratkom vremenskom intervalu. Upravo sinergija aerobnog i anaerobnog metabolizma definira fiziološki profil rukometaša, svrstavajući rukomet među sportove izraženog aerobno-anaerobnog karaktera (Sporiš i sur., 2014).

Uz energetske zahtjeve, rukomet karakteriziraju i visoki neuromišićni zahtjevi koji se očituju potrebom za razvijenom eksplozivnom snagom, brzinom, agilnošću i koordinacijom pokreta. Uspješna izvedba tehničkih elemenata, osobito šuta, ovisi o sposobnosti sportaša da učinkovito generira i prenosi silu kinetičkim lancem, što zahtijeva optimalnu funkciju mišićnog i živčanog sustava (Wagner i sur., 2011; Cherif i sur., 2016; Hermassi i sur., 2010; Hermassi i sur., 2011; Petruzela i sur., 2023).

Sveukupno, fiziološka komponenta rukometne igre može se definirati kao kompleksna i dinamična interakcija kardiovaskularnih, metaboličkih i neuromišićnih procesa koji omogućuju izvođenje ponavljanih visokointenzivnih aktivnosti tijekom utakmice. U tom smislu, razumijevanje fizioloških zahtjeva i mehanizama prilagodbe predstavlja temelj za znanstveno utemeljeno planiranje i programiranje trenažnog procesa, usmjerenog na razvoj specifičnih sposobnosti potrebnih za postizanje visoke razine natjecateljske učinkovitosti u rukometu (Dello Iacono i sur., 2015).

Umor se definira kao smanjenje sposobnosti mišića da generiraju silu što može dovesti do promjena u motoričkoj kontroli i biomehanici pokreta (Buchheit, 2008; Enoka i Duchateau, 2016). U kontekstu rukometa, gdje se šut izvodi u dinamičnim uvjetima, od posebne je važnosti razumjeti kako fiziološko opterećenje utječe na kinematičke parametre šuta. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se pod utjecajem umora mijenjaju kutne brzine zglobova, trajanje kontakta s podlogom te brzina lopte (Glatthorn i sur., 2011; Zhang i sur., 2013; Nuno i sur., 2016; Belčić i sur., 2021; Torabi i sur., 2023; Cecere i sur., 2025). Sličan obrazac pada brzine šuta i promjena u tehnici bacanja pod umorom zabilježen je i kod bejzbol bacača (Tremblay i sur., 2024), što upućuje na to da su navedeni učinci umora karakteristični za eksplozivna bacačka gibanja neovisno o specifičnosti sporta. U suvremenoj fiziologiji sporta umor se klasificira prema lokaciji primarnog poremećaja u lancu živčano-mišićnog sustava na centralni umor i periferni umor (Wan i sur., 2017). Centralni umor definira se kao smanjenje voljne aktivacije skeletnih mišića koje nastaje uslijed promjena na razini središnjeg živčanog sustava, dok periferni umor obuhvaća poremećaje koji nastaju na razini živčano-mišićne spojnice ili distalno od nje, unutar samih mišićnih vlakana (Tornero i sur., 2022). Oba oblika umora mogu se istodobno pojavljivati tijekom visokointenzivnih sportskih aktivnosti kao što je rukometna igra, pri čemu njihov relativni doprinos ovisi o karakteristikama opterećenja.

Centralni umor odnosi se na situaciju u kojoj mozak i središnji živčani sustav više ne mogu slati jednako snažan signal prema mišićima, pa se smanjuje voljna aktivacija i regrutacija motoričkih jedinica. U pozadini su promjene u ravnoteži moždanih neurotransmitera, ponajprije serotonina i dopamina, koje nastaju tijekom dugotrajnog ili intenzivnog opterećenja. Povećana serotoninska aktivnost u središnjem živčanom sustavu povezuje se s većim subjektivnim osjećajem umora, pospanošću te smanjenom motivacijom za nastavak tjelesne aktivnosti. Istovremeno, snižena dopaminska aktivnost može dodatno ograničiti pokretački nagon i voljni angažman tijekom izvedbe. U praksi se centralni umor očituje kao osjećaj pada koncentracije i motivacije te subjektivno veći doživljaj napora pri istoj razini opterećenja, čak i kada mišići još uvijek objektivno mogu proizvesti veću silu. Zbog toga je u planiranju treninga važno uvažiti centralni umor – adekvatnim doziranjem volumena i intenziteta, rasporedom opterećenja i oporavka, ali i upravljanjem psihološkim zahtjevima zadatka (npr. trajanje koncentracije, emocionalni stres) (Cordeiro i sur., 2017; Foley i Fleshner, 2008; Tornero-Aguilera i sur., 2022).

Periferni umor javlja se kada mišić više ne može održavati istu razinu sile zbog lokalnih promjena u samom mišićnom tkivu. Tijekom zahtjevnog ili dugotrajnog opterećenja u mišiću se nakupljaju produkti metabolizma, poput vodikovih iona, troše se zalihe glikogena i remeti se ravnoteža elektrolita, što narušava unutarnju ravnotežu stanice i otežava stvaranje mišićne napetosti. Istovremeno se usporava provođenje živčanog impulsa po mišićnoj membrani, pa se živčano-mišićna aktivacija odvija manje učinkovito, osobito nakon prelaska anaerobnog praga kada je izražen porast laktata i pad pH-vrijednosti u mišiću (Tornero-Aguilera i sur., 2022; Ament i Verkerke, 2009). Posljedično se skraćuje vrijeme tijekom kojeg sportaš može održavati zadani intenzitet, povećava se osjećaj težine u mišiću te se narušava koordinacija pokreta. Smanjena sposobnost kontrole sile i posturalne stabilnosti pod umorom dodatno narušava osjetilno-motoričku kontrolu zglobova i može povećati rizik od ozljeda (Kim i sur., 2024). U praktičnom smislu periferni se umor očituje padom brzine, snage ili preciznosti izvedbe, čak i kada je motivacija sportaša i dalje visoka. Zato je za planiranje trenažnog procesa važno uzeti u obzir trajanje i intenzitet opterećenja, gustoću pauza i razinu treniranosti, kako bi se ograničio prevelik periferni umor i omogućio adekvatan oporavak (Tornero-Aguilera i sur., 2022; Ament i Verkerke, 2009).

Centralni i periferni umor u praksi se rijetko javljaju odvojeno, oni se razvijaju paralelno i međusobno utječu jedan na drugi. Centralni umor ograničava živčani podražaj prema mišićima, dok periferni umor smanjuje sposobnost samog mišića da odgovori na taj podražaj, pa se pad izvedbe može objasniti tek kada se uzmu u obzir oba mehanizma. U sportskoj izvedbi to znači da se subjektivni osjećaj iscrpljenosti, pad motivacije i kognitivno „zasićenje” često javljaju istodobno s lokalnim zamorom mišića, smanjenjem sile i narušavanjem tehnike. Stoga je u analizi opterećenja i planiranju treninga korisno promatrati umor kao integrirani fenomen koji uključuje neurološke, mišićne i psihološke komponente, a ne samo kao „prazne baterije” mišića (Ament i Verkerke, 2009; Tornero-Aguilera i sur., 2022). Novija istraživanja pokazuju da neuromuskularni umor selektivno narušava brzinu prilagodbe sile, dok preciznost može ostati relativno očuvana, što upućuje na kompenzacijske mogućnosti živčano-mišićnog sustava (Kudzia i sur., 2025).

Rukomet postavlja visoke zahtjeve na aerobni i anaerobni energetske sustav, a razvoj umora odvija se na specifičan, nelinearan način tijekom utakmice. Michalsik i Aagaard (2015) utvrdili su da vrhunski rukometaši tijekom utakmice postižu prosječnu

frekvenciju srca od 163 ± 5 otkucaja/min, što odgovara radnom opterećenju od $70,9 \pm 6,0$ % $VO_2\text{max}$. Pritom je relativno opterećenje u prvom poluvremenu statistički značajno više ($75,4$ % $VO_2\text{max}$) u usporedbi s drugim ($66,3$ % $VO_2\text{max}$), što ukazuje na progresivno razvijanje umora tijekom utakmice i na smanjenje kapaciteta za visokointenzivne aktivnosti.

Znakovi privremenog i završnog umora potvrđeni su u studiji Karcher i Buchheit (2014), u kojoj je analiziran razvoj umora tijekom muških rukometnih utakmica. Utvrđeno je statistički značajno smanjenje udjela visoko intenzivnog intermitentnog trčanja od prvog prema drugom poluvremenu ($s\ 4,4 \pm 2,0\%$ na $3,1 \pm 1,7\%$ ukupno prijeđene udaljenosti), kao i smanjenje broja zahtjevnih akcija ($s\ 61 \pm 5$ na 54 ± 6 između prvog i drugog poluvremena) te udjela vremena provedenog pri frekvenciji srca iznad 80% HRmax ($s\ 62 \pm 21\%$ na $41 \pm 17\%$). Prosječna koncentracija laktata u krvi iznosila je $3,6 \pm 2,1$ mmol/L (raspon: $1,3\text{--}8,6$ mmol/L), što upućuje na izmjeničnu aktivaciju aerobnih i anaerobnih energetske procesa. Nakon utakmice zabilježeno je i statistički značajno smanjenje izvedbe vertikalnog skoka ($7,4 \pm 6,5\%$), akceleracijskih sposobnosti i aerobnog kapaciteta, što potvrđuje razvoj neuromišićnog umora.

Póvoas i sur. (2012) su, analizirajući fiziološke zahtjeve elitnog rukometa, utvrdili da visoke vrijednosti koncentracije laktata i srčane frekvencije ne dovode nužno do trajnog pada u izvedbi ako postoje adekvatni odmori, no u neprekidno visokointenzivnim fazama igre dolazi do kumulativnog akumuliranja metaboličkih produkata koji uzrokuju periferni i centralni umor.

1.4. Skok šut – biomehanička struktura i kinematička analiza

U nastavku analize ključnih elemenata rukometne igre, šut na gol predstavlja završnu fazu napadačkog procesa i jedan od temeljnih elemenata uspješnosti u rukometnoj igri, budući da izravno determinira realizaciju napada i rezultat utakmice. U suvremenom rukometu, obilježenom visokom dinamikom igre i sve većim taktičkim zahtjevima, učinkovitost šuta postaje jedan od najvažnijih pokazatelja kvalitete pojedinca i momčadi (Rogulj i sur., 2004; Meletakos i sur., 2011; Vila i Ferragut, 2019). Analize natjecateljske uspješnosti pokazuju da je veća realizacija šuta snažno povezana s pobjedom, neovisno o drugim segmentima igre, pri čemu se učinkovitost završnice napada ističe kao jedan od ključnih čimbenika koji razlikuju uspješne od manje uspješnih momčadi (Ferrari i sur., 2020; González-García i Casáis Martínez,

2023). Polazeći od njegove središnje uloge u strukturi igre, šutiranje u rukometu obuhvaća velik broj tehničkih varijanti koje se razlikuju prema načinu kretanja, položaju tijela, smjeru i visini izbačaja te situacijskim uvjetima izvedbe. Najčešće se šutovi klasificiraju prema biomehaničkim i situacijskim obilježjima: šut iz mjesta, šut iz kretanja, šut iz okreta, skok šut ili šut iz pada, a u odnosu na način kretanja lopte razlikujemo pravocrtno, parabolično, šutiranje odbijanjem lopte i s rotacijom (Rogulj, 2021). Ovakva klasifikacija omogućuje sustavno razumijevanje tehničkih rješenja u odnosu na zahtjeve igre, pri čemu svaka kategorija šuta odražava specifične biomehaničke i taktičke uvjete izvedbe.

U tom kontekstu, pojedine vrste šuta se mogu dodatno analizirati s obzirom na njihove funkcionalne i situacijske specifičnosti. Šut iz mjesta karakterizira stabilna baza oslonca i veća kontrola pokreta, ali i ograničena mogućnost izbjegavanja obrambenog bloka. Šut iz prodora i šut s pozicije kružnog napadača izvode se u uvjetima smanjenog prostora i često u izravnom kontaktu s protivnikom, što zahtijeva visoku razinu snage i koordinacije. Šut iz kontranapada izvodi se pri velikim brzinama kretanja i pod izraženim vremenskim pritiskom, dok sedmerac predstavlja specifičnu situaciju izvođenja bez izravnog obrambenog ometanja, pri čemu do izražaja dolaze preciznost i psihološka stabilnost izvođača.

U okviru navedene klasifikacije, skok šut zauzima posebno mjesto kao najzastupljenija i biomehanički najzahtjevnija tehnika šutiranja. Njegova osnovna prednost leži u mogućnosti izvođenja izbačaja lopte iznad obrambenog bloka, čime se povećava kut izbačaja i smanjuje vjerojatnost blokade (Wagner i sur., 2011). Biomehanički promatrano, skok šut omogućuje optimalno korištenje kinetičkog lanca kroz sekvencijalnu aktivaciju donjih ekstremiteta, trupa i gornjih ekstremiteta, što rezultira većom brzinom lopte u odnosu na druge vrste šuta (van den Tillaar i Ettema, 2004; Pori i sur., 2005; Wagner i sur., 2012).

Dodatnu važnost skok šuta potvrđuju i analize natjecateljske strukture igre na vrhunskoj razini. Analize utakmica na najvišoj razini natjecanja ukazuju na to da skok šut čini dominantan udio u ukupnom broju šutova. Analiza rukometne igre pokazuje da se između 73 % i 75 % svih šutova u vrhunskom rukometu odnosi na skok šut, osobito kod vanjskih igrača (Wagner i sur., 2008). Takva zastupljenost dodatno naglašava njegovu važnost u strukturi igre, ali i potrebu za detaljnim znanstvenim proučavanjem njegove biomehaničke i funkcionalne učinkovitosti, osobito u kontekstu učinkovitosti napadačkih modela igre (Ferrari i sur., 2020).

Osim kvantitativne zastupljenosti, skok šut ima i iznimno važnu taktičku ulogu jer omogućuje realizaciju iz pozicijskih napada protiv organizirane obrane, što ga čini jednim od ključnih elemenata u odlučujućim fazama utakmice (González-García i Casáis Martínez, 2023). Njegova izvedba zahtijeva visoku razinu eksplozivne snage, koordinacije i preciznosti, kao i sposobnost prilagodbe različitim situacijskim uvjetima igre. Eriksrud i sur. (2019) pokazali su da funkcionalna mobilnost i dinamička posturalna kontrola statistički značajno predviđaju uspješnost šuta kod vrhunskih ženskih rukometašica, naglašavajući važnost cjelovite kinetičke pripremljenosti za izvedbu skok šuta.

S obzirom na biomehaničku kompleksnost, visoku zastupljenost i ključnu ulogu u uspješnosti igre, skok šut predstavlja optimalan model za analizu utjecaja različitih čimbenika na tehničku izvedbu u rukometu. Upravo iz tih razloga, u ovoj disertaciji fokus istraživanja usmjeren je na kinematičku analizu skok šuta kao reprezentativnog i najrelevantnijeg oblika šutiranja u suvremenom rukometu.

Skok šut u rukometu posebna je tehnika šutiranja u kojoj igrač izvodi završni dio izbačaja lopte dok je u zraku, nakon odraza od podloge, s jasnim prijenosom pokreta od donjih ekstremiteta, preko trupa, do šuterske ruke (Pori i sur., 2005; Wagner i sur., 2011). Radi se o visoko koordiniranom motoričkom obrascu u kojemu se kinetički lanac aktivira na optimalan način s ciljem postizanja maksimalne učinkovitosti izvedbe. Definira se i kao osnovna eksplozivna tehnika završetka napada u kojoj igrač integrira zalet, vertikalni odraz i koordinirani zamah ruke s ciljem postizanja maksimalne brzine i visine izbačaja lopte (Rogulj, 2021). Istraživanja provedena na vrhunskim rukometašima pokazuju da se izvedba skok šuta razlikuje ovisno o razini igrača i specifičnim zahtjevima situacije u igri, pri čemu su kinematički parametri pojedinih faza skok šuta opisani i analizirani kod ženskih rukometašica različitih dobnih kategorija (Ohnjec i sur., 2010; Wagner i sur., 2010; Yassen, 2021). Noviji podatci dobiveni trodimenzionalnom analizom bacanja dodatno ističu važnost precizne kontrole kinematičkih parametara ramenog zgloba, nadlaktice i podlaktice u oblikovanju brzine izbačaja lopte (Marin i sur., 2024). Slijedom navedenoga, skok šut može se promatrati kao kompleksan integrirani model tehničko-taktičke i biomehaničke izvedbe u rukometu.

Strukturne faze skok šuta u rukometu mogu se jasno opisati u pet međusobno povezanih faza: zalet, odraz, let, izbačaj i doskok, pri čemu je svaka od njih funkcionalno povezana s prethodnom i sljedećom u okviru jedinstvenog kinematičkog

lanca (Zvonarek i sur., 1997; Pori i sur., 2005; Ohnjec i sur., 2010; Burger, 2016). Takva podjela omogućuje detaljnu biomehaničku analizu svakog segmenta pokreta, ali i razumijevanje njihove međusobne ovisnosti u cjelokupnoj izvedbi.

Zalet započinje inicijalnim prilazom igrača prema mjestu odraza te usmjerava kinematički i taktički kontekst za cjelokupnu izvedbu skok šuta. U ovoj fazi generira se horizontalna komponenta brzine koja se potom prenosi u vertikalnu i rotacijsku komponentu gibanja. Ključni elementi uključuju ritam koraka, duljinu i smjer posljednja dva koraka te optimalno pozicioniranje trupa i ramenog pojasa u odnosu na cilj. Kontrola položaja težišta tijela, pravilan raspored opterećenja tijekom zaleta omogućuju učinkovitu sekvencijalnu aktivaciju proksimalno-distalnih segmenata tijela tijekom odraza (van den Tillaar i sur., 2013; Moreno i sur., 2023). Istodobno zalet ima izraženu taktičku dimenziju jer uključuje kontinuiranu percepciju obrambenih aktivnosti te eventualne korekcije brzine smjera kretanja s ciljem stvaranja povoljnijeg kuta za šut ili mogućnosti fintiranja (Rogulj, 2021).

Odras predstavlja ključnu eksplozivnu fazu u kojoj se horizontalna komponenta brzine ostvarena u zaletu pretvara u vertikalnu (i djelomično horizontalnu) komponentu sile. U ovoj fazi od presudne je važnosti pravovremena i učinkovita sinkronizacija prijenosa sile iz donjih ekstremiteta preko trupa prema ramenom pojasu i šuterskoj ruci, čime se ostvaruje optimalna segmentna sekvenca (zdjelica – trup – rame – nadlaktica – podlaktica – šaka) za maksimiziranje brzine lopte prilikom izbačaja (van den Tillaar i sur., 2013; Skejvold i sur., 2019).

Ključni čimbenici uspješnosti odraza uključuju kut i moment sile, stabilnost i ravnotežu tijela te izbjegavanje nepotrebnih korektivnih pokreta koji mogu narušiti biomehaničku učinkovitost. Također, u ovoj fazi dolazi do pripreme gornjeg ekstremiteta za kasniju akceleraciju šuterske ruke. Utjecaj umora ili promjena položaja centra težišta tijela u ovoj fazi može značajno smanjiti sposobnost generiranja sile te narušiti vremensku strukturu kasnijih faza izbačaja (Bedo i sur., 2022; Torabi i sur., 2023).

Faza leta započinje trenutkom napuštanja podloge i traje do početka izbačaja lopte, pri čemu igrač postiže željenu visinu i pozicionira tijelo za optimalan kut izbačaja. Ova faza predstavlja dinamičko razdoblje u kojem trup i zdjelica osiguravaju stabilnu platformu za realizaciju rotacijskih i translacijskih komponenti gibanja, dok se gornji ekstremitet priprema za maksimalnu akceleraciju.

U ovoj fazi ključnu ulogu imaju položaj tijela u odnosu na vratara i obrambene igrače, kontrola orijentacije trupa te usklađenost pokreta nadlaktice i podlaktice tijekom zamaha i faze ubrzanja (Skejø i sur., 2019; Moreno i sur., 2023). Trajanje faze leta može utjecati na mogućnost generiranja brzine lopte, pri čemu veći kut odraza može povećati vrijeme leta, ali istodobno potencijalno smanjiti kinetičku energiju prenesenu na loptu zbog promijenjene distribucije sile (van den Tillaar i sur., 2013).

Faza izbačaja obuhvaća finalnu akceleraciju gornjeg ekstremiteta i otpuštanje lopte te predstavlja terminalnu fazu u kojoj se određuju brzina, smjer i rotacija lopte. Mehanika izbačaja temelji se na precizno sinkroniziranom djelovanju rotacije trupa te zglobnih rotacija ramenog zgloba (unutarnja rotacija), lakta (ekstenzija) i ručnog zgloba (brza fleksija) šuterske ruke, pri čemu se sve odvija u izrazito kratkom vremenskom intervalu.

Uspješnost izbačaja ovisi o točnom vremenskom usklađivanju segmentnih pokreta i prilagodbi kuta izbačaja situacijskim uvjetima, pri čemu je tolerancija pogreške minimalna. Pod utjecajem umora često dolazi do smanjenja kutnih i linearnih brzina te promjena u vremenskoj organizaciji segmentne sekvence (Jalalifar i sur., 2022; Torabi i sur., 2023). Uz biomehaničke zahtjeve, u ovoj fazi dolazi do izražaja i integracija perceptivno-kognitivnih procesa, s obzirom na to da igrač mora procijeniti položaj obrane i vratara te u djeliću sekunde donijeti odluku o smjeru i načinu izbačaja (Ohnjec i sur., 2021; Rogulj, 2021).

Faza doskoka započinje nakon izbačaja lopte i ima dvostruku funkciju: sigurnu apsorpciju sila nastalih tijekom odraza i osiguranje brze tranzicije u daljnji tijek igre. Tehnički, kontrolirani doskok uključuje koordinirano amortiziranje opterećenja kroz skočni zglob i zglob koljena te kuk, uz održavanje ravnoteže i spremnosti za sljedeći motorički zadatak.

Nepravilno izveden doskok povećava rizik od ozljeda i može negativno utjecati na taktičku funkcionalnost, primjerice gubitkom vremena ili nepovoljnim položajem za obrambenu tranziciju (Foretić i sur., 2010; Rogulj, 2021). U taktičkom smislu, doskok omogućuje brzi prijelaz u obranu ili nastavak napada u slučaju zadržavanja posjeda lopte, zbog čega su njegova stabilnost i ekonomičnost važni elementi ukupne učinkovitosti izvedbe.

Sve faze skok šuta međusobno su funkcionalno povezane i ovisne, pri čemu se nedostaci u ranijim fazama reflektiraju na učinkovitost kasnijih segmenata izvedbe.

Tako nedostatna učinkovitost zaleta ili odraza izravno utječe na kvalitetu faze leta i izbačaja, dok nepravilan doskok smanjuje ukupnu taktičku vrijednost izvedbe.

Sukladno tomu, trenažni proces mora biti usmjeren na sustavno i integrirano razvijanje svih segmenata skok šuta, pri čemu je cilj postizanje visoke razine funkcionalne automatizacije u uvjetima igre (Ohnjec i sur., 2021; Rogulj, 2021; Pueo i sur., 2023). Trenažne metode trebaju razvijati eksplozivnu snagu donjih i gornjih ekstremiteta te uključivati situacijske vježbe s manipulacijom prostora i brojem igrača, kako bi se osigurala stabilnost motoričke izvedbe i njezina učinkovita primjena u realnim natjecateljskim uvjetima (Bedo i sur., 2022; Torabi i sur., 2023).

Tablica 1.1. Sekvencijalni biomehanički opis pokreta u rukometnom šutu - korigirana tablica (Wagner i sur., 2010; van den Tillaar i Ettema, 2007)

segment	vrsta pokreta	biomehanička uloga u šuterskom lancu
trup	rotacija trupa i fleksija trupa	Trup predstavlja početni proksimalni segment koji generira i prenosi energiju prema ramenom obruču. Povećanje kutne brzine rotacije i fleksije trupa doprinosi učinkovitijem prijenosu impulsa prema distalnim segmentima.
rameni obruč	elevacija i rotacija ramenog obruča	Rameni obruč stabilizira i usmjerava poziciju nadlaktice te omogućuje povoljan položaj ramenog zgloba za vanjsku i unutarnju rotaciju u pripremi i akceleraciji šuta.
nadlaktica	rotacijski pokreti u ramenom zglobu (vanjska → unutarnja rotacija)	Nadlaktica funkcionira kao prijenosni segment između trupa i podlaktice. Njezino gibanje obilježeno je rotacijom i prijenosom kutne brzine kroz rameni zglob, čime doprinosi akceleraciji lopte.
podlaktica	ekstenzija lakta i pronacija podlaktice	Podlaktica sudjeluje u distalnoj akceleraciji kroz ekstenziju lakta i završnu pronaciju, povećavajući učinkovitost usmjeravanja lopte prema cilju. Pokreti imaju rotacijsku, a ne linearnu prirodu.
šaka (ručni segment)	fleksija ručnog zgloba i stabilizacija pri otpuštanju lopte	Završni distalni segment sudjeluje u finoj motoričkoj kontroli i preciznom usmjeravanju lopte; njegov doprinos brzini izbačaja uvjetovan je učinkovitošću proksimalnijih segmenata.

Skok šut u rukometu složena je višezglobna motorička struktura čija se učinkovitost temelji na proksimalno-distalnom slijedu aktivacije segmenata kinetičkog lanca. Taj obrazac podrazumijeva uzastopno uključivanje pojedinih dijelova tijela u gibanje – od proksimalnih prema distalnim segmentima – pri čemu svaki segment zaustavlja vlastito kretanje i prenosi zamah na sljedeći, distalniji segment (Tablica 1.1). Trup započinje prijenos energije rotacijom i fleksijom, čime se generira inicijalni impuls

koji se prenosi prema ramenom obruču. Rameni zglobovi u pripremnoj fazi izvodi izraženu vanjsku rotaciju, nakon koje slijedi brza unutarnja rotacija koja predstavlja jedan od najvažnijih doprinosa konačnoj brzini lopte. García-Buendía i sur. (2022) u pilot-studiji pokazali su da veći raspon unutarnje rotacije ramena statistički značajno korelira s višom brzinom šuta kod rukometaša, čime se potvrđuje ključna biomehanička uloga tog pokreta u završnoj fazi izbačaja. Nadlaktica funkcionira kao prijenosni segment, dok lakat ekstenzijom neposredno prije izbačaja lopte daje jedan od ključnih distalnih doprinosa brzini. Podlaktica u završnoj fazi izvodi pronaciju, a ručni zglobovi i šaka kao završni distalni segmenti osiguravaju finu motoričku kontrolu i precizno usmjeravanje lopte prema cilju. Učinkovitost cijelog mehanizma uvjetovana je vremenskom usklađenošću svih segmenata – narušavanje redoslijeda ili smanjenje brzine u bilo kojoj karici lanca izravno se odražava na konačnu brzinu i preciznost izbačaja (van den Tillaar i Ettema, 2007; Wagner i sur., 2010).

1.5. Utjecaj umora na kinematiku skok šuta i istraživačka praznina

Biomehanička učinkovitost skok šuta u rukometu uvelike ovisi o preciznoj sinkronizaciji faza zaleta, odraza, leta i izbačaja lopte, pri čemu se mehanička energija generirana u donjim ekstremitetima prenosi trupom prema gornjim ekstremitetima u okviru jedinstvenog kinematičkog lanca. Svaka od navedenih faza uključuje specifične odnose zglobovskih kutova, kutnih brzina i sila, a njihova optimalna vremenska usklađenost ključna je za postizanje maksimalne brzine lopte i visoke preciznosti šuta (Wagner i sur., 2011). U uvjetima umora dolazi do narušavanja neuromuskularne koordinacije i promjena u vremenskoj organizaciji pokreta, što može rezultirati izmjenama kinematičkih parametara te smanjenjem učinkovitosti izvedbe (Shumway-Cook i Woollacott, 2017). U kontekstu natjecateljskog rukometa, gdje se šutovi izvode pod vremenskim pritiskom, uz prisutnost protivnika i kumulativno fiziološko opterećenje, razumijevanje tih promjena od posebne je važnosti za optimizaciju izvedbe i prevenciju ozljeda.

Plummer i Oliver (2015) proveli su istraživanje u kojem su ispitali učinke aerobnog umora na kinematiku skok šuta kod rukometaša. Aerobni umor induciran je protokolom trčanja do iscrpljenosti pri intenzitetu od 80 % maksimalne srčane frekvencije, nakon čega su kinematički parametri analizirani elektromagnetskim sustavom praćenja. Rezultati su pokazali statistički značajne promjene u kinematici

zdjelice i trupa, pri čemu je lateralna fleksija zdjelice prema kontralateralnoj strani bila značajno izraženija u trenutku izbačaja lopte nakon umora ($s -21,90^{\circ} \pm 5,99^{\circ}$ na $-25,55^{\circ} \pm 7,79^{\circ}$), dok se rotacija trupa povećala sa $-6,80^{\circ} \pm 10,07^{\circ}$ na $-12,55^{\circ} \pm 10,97^{\circ}$ u fazi maksimalne vanjske rotacije. Autori zaključuju da takve promjene ukazuju na pojavu kompenzacijskih mehanizama u uvjetima umora, koji mogu povećati opterećenje na zglobne strukture gornjeg ekstremiteta i potencijalno povećati rizik od ozljeda.

Slične nalaze u kontekstu promjena izvedbe pod utjecajem umora navode Nuño i sur. (2016), koji su istraživali učinke centralnog i perifernog umora na brzinu lopte i preciznost šuta kod rukometaša. Primjenom specifičnog rukometnog kružnog treninga s progresivno skraćenim intervalima odmora (od 80 s do 10 s), uz praćenje srčane frekvencije, koncentracije laktata i skale percipiranog napora, utvrđeno je da s porastom razine umora dolazi do statistički značajnog smanjenja i brzine lopte i preciznosti šuta. Brzina lopte počela se smanjivati već nakon prvog kruga treninga ($-4,5\%$), dok je preciznost šuta pokazala značajan pad tek pri višim razinama umora, i to za 37% na kraju trećeg te 73% na kraju četvrtog kruga protokola. Autori prikazuju preciznost kao srednju vrijednost uz standardnu devijaciju ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) u grafičkom obliku, pri čemu padovi od 37% i 73% predstavljaju skupne srednje vrijednosti, bez zasebno navedenih numeričkih vrijednosti SD u tekstu, što sugerira značajan prosječni pad uz izraženu varijabilnost unutar uzorka. Ovi rezultati ukazuju na to da različite komponente izvedbe šuta ne reagiraju jednako na umor, pri čemu je preciznost osjetljivija na veće razine fiziološkog opterećenja.

Suprotno navedenim nalazima, Plummer i Oliver (2016) nisu utvrdili statistički značajne razlike u kinematičkim i kinetičkim parametrima skok šuta nakon lokaliziranog umora gornjeg ekstremiteta, induciranog protokolom bacanja medicinke do voljne iscrpljenosti. Iako je zabilježeno smanjenje brzine lopte s 19,8 m/s na 18,8 m/s te smanjenje preciznosti sa 60,8 % na 52,8 %, navedene promjene nisu bile statistički značajne. Autori zaključuju da lokalizirani umor gornjeg ekstremiteta ne mora nužno dovesti do značajnih promjena u biomehanici šuta te ističu važnost specifičnosti protokola indukcije umora, pri čemu se naglašava da protokoli koji uključuju cijelo tijelo i bolje simuliraju zahtjeve rukometne igre vjerojatno uzrokuju izraženije promjene u izvedbi.

U istraživanju provedenom na mladim rukometašima utvrđeno je da umor gornjeg ekstremiteta statistički značajno smanjuje brzinu šuta za 3 % ($p = 0,022$), uz istodobno smanjenje mobilnosti i stabilnosti ramenog zgloba (Bauer i sur., 2020). Navedene promjene posljedica su smanjenog živčano-mišićnog aktivacijskog kapaciteta i narušene osjetilno-motoričke kontrole zglobnih struktura uslijed metaboličkih promjena izazvanih umorom. To se očituje u smanjenoj sposobnosti precizne koordinacije pokreta i stabilizacije ramenog zgloba tijekom izvedbe šuta. Ovi rezultati dodatno potvrđuju da umor može utjecati ne samo na izvedbenu učinkovitost već i na funkcionalnu stabilnost zglobnih struktura uključenih u šuterski pokret.

Hadjisavvas i sur. (2024) u istraživanju provedenom na rukometašima ispitali su učinak umora gornjeg ekstremiteta induciranog koncentričnim vježbanjem na propriocepciju, motoričku kontrolu i izvedbu šuta. Rezultati su pokazali da umor gornjeg ekstremiteta narušava proprioceptijsku preciznost ramenog zgloba i smanjuje motoričku kontrolu pri izvođenju šuta, što upućuje na to da se živčano-mišićne promjene uzrokovane umorom ne očituju isključivo u smanjenju sile ili brzine, već i u narušavanju senzomotoričke integracije zglobnih struktura gornjeg ekstremiteta. Navedeni nalaz nadopunjuje zaključke autora Bauera i sur. (2020) o smanjenju mobilnosti i stabilnosti ramena pod umorom te ističe proprioceptijsku komponentu kao dodatni mehanizam kojim umor utječe na kvalitetu šuterske izvedbe.

Odnos brzine i preciznosti u bacačkim gibanjima često se opisuje konceptom kompromisa brzina–preciznost, pri čemu povećanje brzine može dovesti do narušavanja preciznosti. Međutim, Van den Tillaar i Ettema (2006) pokazali su da ni eksperti ni početnici pri bacanju preko ramena ne pokazuju klasičan kompromis između brzine i preciznosti. Promjena uputa („šutiraj jako” nasuprot „šutiraj normalno”) utjecala je na brzinu lopte i kinematiku segmenata, ali ne i na preciznost, što upućuje na relativnu stabilnost preciznosti šuta unatoč promjenama brzine. Slično tomu, Akyüz i sur. (2019) utvrdili su da akutni skeletno-mišićni umor, induciran 30–15IFT protokolom na razini 75% maksimalne potrošnje kisika, kod elitnih muških rukometaša ne mijenja ni preciznost šuta ni brzinu lopte, nego se učinak umora očituje tek u suptilnim promjenama akceleracije ručnog zgloba kod nepreciznih šuteva. U našem istraživanju, provedenom u specifičnom kontekstu maksimalnog opterećenja i skok šuta, zabilježen je drugačiji obrazac: statistički značajan pad brzine lopte (-3,1%) praćen je paradoksalnim poboljšanjem skupne mjere preciznosti (-17,8% odstupanja od centra cilja), što sugerira da pod visokim umorom dio igrača intuitivno preusmjerava naglasak

s maksimalne brzine prema kontroliranijoj, preciznijoj izvedbi šuta. Usporedba ovih nalaza upućuje na to da kompromis brzina–preciznost u rukometnom šutu nije univerzalno prisutan, već ovisi o razini opterećenja, tipu zadatka (skok šut nasuprot nadvratnom bacanju iz mjesta), načinu operacionalizacije preciznosti i karakteristikama uzorka. Nalazi ovih istraživanja dodatno podcrtavaju specifičnost rezultata našeg rada i opravdavaju postavljene hipoteze.

Sveukupno, pregled dosadašnjih istraživanja upućuje na to da umor aerobnog, lokaliziranog ili kombiniranog podrijetla uzrokuje mjerljive promjene u kinematičkim i izvedbenim parametrima skok šuta. Pri višim razinama fiziološkog opterećenja navedene se promjene očituju kroz poremećaje u kinematici zdjelice i trupa, narušavanje koordinacije segmentalnog kretanja te smanjenje brzine i preciznosti šuta. Međutim, rezultati istraživanja nisu u potpunosti konzistentni, što se može objasniti razlikama u protokolima indukcije umora, razini ispitanika i korištenim metodama mjerenja. Upravo ta neujednačenost nalaza ukazuje na potrebu za daljnjim istraživanjima koja će preciznije kvantificirati promjene u kinematičkom lancu skok šuta u uvjetima umora koji vjernije odražavaju zahtjeve natjecateljskog rukometa.

Suvremena biomehanička istraživanja sve se više oslanjaju na primjenu naprednih mjernih sustava koji omogućuju preciznu analizu kretanja u stvarnim natjecateljskim uvjetima (Penichet-Tomas, 2024). Jedan od takvih sustava je *Xsens MVN*, koji se temelji na inercijskim mjernim jedinicama (IMU) te omogućuje trodimenzionalno praćenje kinematičkih parametara pokreta u stvarnom vremenu, bez ograničenja laboratorijskog okruženja (Robert-Lachaine i sur., 2017; Schepers i sur., 2018; Mielniczek i sur., 2025). Za razliku od tradicionalnih optoelektroničkih sustava, IMU tehnologija omogućuje veću mobilnost, primjenu u realnim uvjetima igre te simultano praćenje većeg broja segmenata tijela, što je osobito važno u analizi kompleksnih motoričkih zadataka poput skok šuta u rukometu.

U kontekstu ove disertacije, metodološki pristup temelji se na integraciji kinematičkih, fizioloških i subjektivnih pokazatelja umora. Kinematička analiza obuhvaća mjerenje kutnih i linearnih brzina segmenata tijela, trajanja faza pokreta i koordinacijskih odnosa unutar kinematičkog lanca, dok se fiziološko opterećenje procjenjuje putem srčane frekvencije i koncentracije laktata u krvi kao valjanih pokazatelja metaboličkog stresa (Póvoas i sur., 2012; Michalsik i Aagaard, 2015). Uz to, subjektivna percepcija napora prati se primjenom Borgove skale, koja se pokazala

pouzdanim alatom za procjenu unutarnjeg opterećenja sportaša (Borg, 1982; Williams, 2017).

Takav multimodalni pristup omogućuje cjelovit uvid u promjene koje nastaju pod utjecajem umora, jer integrira objektivne biomehaničke i fiziološke mjere sa subjektivnim doživljajem opterećenja. Time se povećava vrijednost interpretacije dobivenih rezultata i omogućuje preciznije razumijevanje mehanizama koji utječu na izvedbu složenih sportskih pokreta.

Unatoč rastućem broju istraživanja koja se bave utjecajem umora na sportsku izvedbu, i dalje postoji značajan nedostatak radova koji sustavno i integrirano analiziraju kinematičke promjene skok šuta u rukometu u uvjetima specifičnog, natjecateljskog umora. Utvrđeno je da fiziološko opterećenje utječe na biomehaničke i motoričke parametre, uključujući promjene u koordinaciji, brzini pokreta i preciznosti (Enoka i Duchateau, 2008; Zhang i sur., 2013; Vial i sur., 2023; Mortimer i sur., 2024). Međutim, većina dosadašnjih istraživanja provedena je u kontroliranim laboratorijskim uvjetima ili na izoliranim motoričkim zadacima, što značajno ograničava njihovu primjenjivost u kontekstu stvarne rukometne igre.

U rukometu su dostupna istraživanja pokazala da umor može uzrokovati smanjenje brzine lopte, promjene u koordinaciji pokreta te narušavanje eksplozivnosti (Nuño i sur., 2016; Póvoas i sur., 2016; Seipp i sur., 2022; Martins i sur., 2024). Ipak, ostaje nedovoljno razjašnjeno u kojoj mjeri navedene promjene zahvaćaju finu strukturu kinematičkog lanca, osobito u završnim fazama pokreta koje su ključne za učinkovitost šuta. Istraživanja često koriste nespecifične protokole induciranja umora koji ne odražavaju stvarne zahtjeve rukometne igre, što dodatno otežava primjenu dobivenih rezultata u praksi.

Novija istraživanja ukazuju na važnost analize promjena u aktivaciji mišića, stabilnosti trupa i koordinaciji segmenata pod utjecajem umora, no takvi pristupi rijetko uključuju simultano praćenje kinematičkih i fizioloških varijabli (Torabi i sur., 2023; Li i sur., 2025). Upravo takva integracija predstavlja ključnu istraživačku prazninu koju ova disertacija nastoji popuniti.

Znanstveno razumijevanje utjecaja umora na kinematičku strukturu izvedbe skok šuta ima neposredan praktičan značaj za planiranje treninga, prevenciju ozljeda i optimizaciju izvedbe u rukometu. Skok šut predstavlja jedan od ključnih tehničkih elemenata igre, a njegova učinkovitost ovisi o preciznoj sinkronizaciji pokreta

kinetičkim lancem, od donjih ekstremiteta preko trupa do gornjih ekstremiteta (Wagner i sur., 2011).

Nalazi dosadašnjih istraživanja sugeriraju da umor ne djeluje podjednako na cijelu strukturu pokreta, već češće selektivno narušava završne i najzahtjevnije komponente izvedbe, povezane s visokim zahtjevima za živčano-mišićnom aktivacijom u kratkom vremenskom intervalu (npr. Belčić i sur., 2021). Posljedično dolazi do smanjenja brzine lopte, promjena u koordinaciji pokreta te povećanja rizika od ozljeda uslijed kompenzacijskih mehanizama u izvedbi (Plummer i Oliver, 2016; Bauer i sur., 2020).

S praktičnog aspekta rezultati ovakvih istraživanja mogu doprinijeti razvoju specifičnih trenažnih programa usmjerenih na povećanje otpornosti kinematičkog obrasca na umor, što je osobito važno u završnim fazama utakmice kada se odlučuje ishod natjecanja. Integracijom biomehaničkih, fizioloških i perceptivnih mjera moguće je preciznije definirati optimalne uvjete treninga i oporavka te individualizirati trenažni proces u skladu sa zahtjevima vrhunskog sporta.

Dosadašnja istraživanja jasno pokazuju da fiziološki umor uzrokuje značajne promjene u kinematičkim, živčano-mišićnim i izvedbenim parametrima skoka šuta, osobito u završnim fazama pokreta i brzini lopte. Međutim, nedostatak integriranih istraživanja koja istodobno analiziraju kinematičke i fiziološke pokazatelje u uvjetima specifičnog rukometnog opterećenja opravdava provedbu ovog istraživanja.

Slijedom navedenoga, ova disertacija nastoji pridonijeti znanstvenom razumijevanju mehanizama utjecaja umora na tehničku izvedbu skok šuta te pružiti primjenjive smjernice za optimizaciju trenažnoga procesa u rukometu.

2. CILJ I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Cilj u ovom istraživanju je utvrditi utječe li razina fiziološkog opterećenja na promjene u određenim kinematičkim parametrima kod izvođenja skok šuta u rukometu.

Sukladno ciljevima istraživanja postavljene su sljedeće hipoteze:

- H1 – postoje statistički značajne razlike u promatranim kinematičkim parametrima kod izvođenja skok šuta na gol prije i nakon fiziološkog opterećenja u gornjem dijelu kinematičkog lanca
- H2 – postoje statistički značajne razlike u promatranim kinematičkim parametrima kod izvođenja skok šuta na gol prije i nakon fiziološkog opterećenja u donjem dijelu kinematičkog lanca
- H3 – postoje statistički značajne razlike u brzini izbačaja lopte kod skok šuta na gol prije i nakon fiziološkog opterećenja
- H4 – postoje statistički značajne razlike u duljini trajanja kontakta stopala odrazne noge s podlogom kod izvođenja skok šuta prije i nakon fiziološkog opterećenja
- H5 – postoje statistički značajne razlike u preciznosti šutiranja kod skok šuta prije i nakon fiziološkog opterećenja.

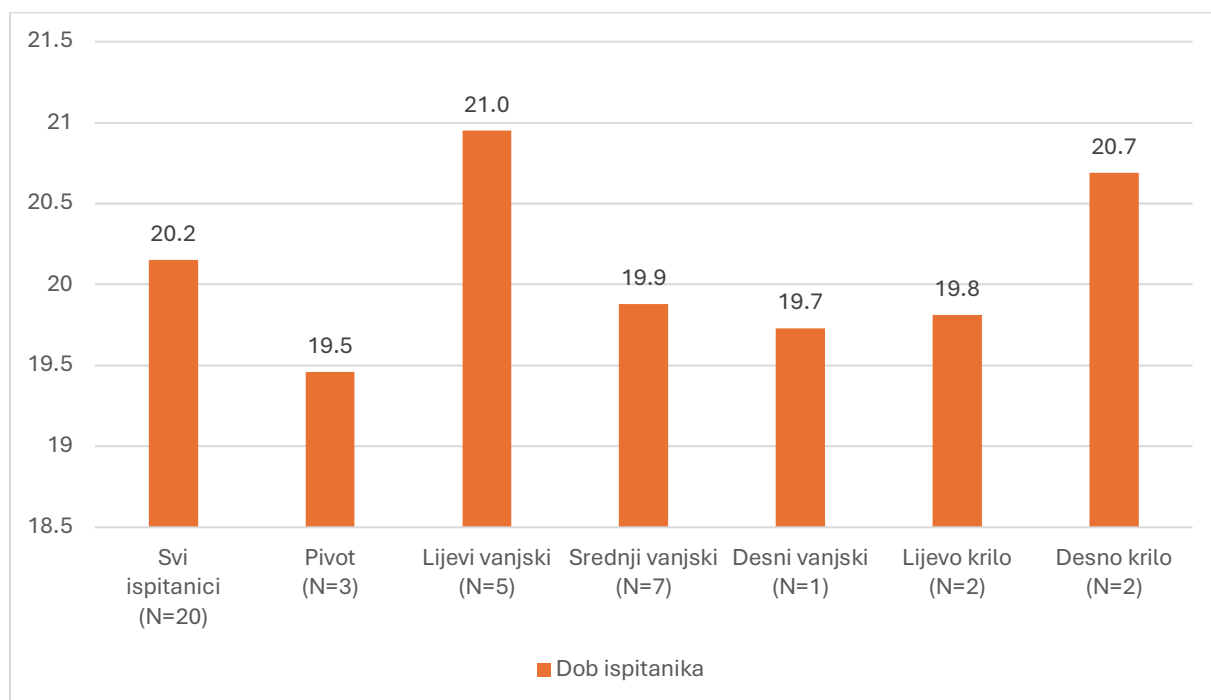
3. METODE RADA

Odabir metodološkog pristupa u ovom istraživanju temelji se na višedimenzionalnoj analizi biomehaničkih i fizioloških parametara skok šuta u rukometu, uz primjenu validiranih mjernih sustava i statističkih postupaka koji omogućavaju preciznu kvantifikaciju promjena izazvanih umorom. Kombinacija objektivnih mjerenja i subjektivnih procjena osigurava sveobuhvatan uvid u učinke iscrpljivanja na sportsku izvedbu.

3.1. Uzorak ispitanika

Uzorak ispitanika sastoji se od 20 rukometaša (dob: $20,15 \pm 1,75$; visina: $188,00 \pm 5,69$ cm; težina: $88,92 \pm 8,85$ kg; udio postotka masti: $13,02 \pm 3,42$ %). U istraživanje su bili uključeni samo igrači koji nastupaju u Premier i 1. ligi (klubovi uključeni u istraživanje – RK Karlovac, RK Dubrava, RK Dugo Selo). Od ukupnog broja ispitanika, 17 je dešnjaka (šuterska ruka) te 3 ljevaka. Prikaz dobi i igračkih pozicija ispitanika vidljiv je na Slici 3.1.

Slika 3.1. Dob i igračke pozicije ispitanika koji su sudjelovali u istraživanju



Tijekom provedbe mjerenja ispitanici nisu imali zdravstvenih poteškoća u proteklih godinu dana što je predstavljalo kriterij isključivanja. Kako bi se izbjegao utjecaj umora na rezultate mjerenja, igrači su dva dana prije testiranja imali smanjen obujam i intenzitet treninga te nisu igrali utakmice. Mjerenje se provodilo nakon natjecateljske sezone prije sezonskog odmora kako bi se izbjegao utjecaj testiranja na trenažni, odnosno natjecateljski period. Prije početka mjerenja ispitanici su dobili detaljne informacije o protokolu mjerenja, svrsi i rizicima istraživanja.

3.2. Uzorak varijabli

Uzorak varijabli sačinjava set varijabli za utvrđivanje morfoloških karakteristika ispitanika, zatim fizioloških i kinematičkih parametara, brzine izbačaja lopte i preciznosti šutiranja tijekom izvedbe skok šuta. U ovom istraživanju analizirane su varijable koje obuhvaćaju ključne biomehaničke i fiziološke pokazatelje skok šuta u rukometu, s ciljem kvantifikacije promjena izazvanih fiziološkim umorom. Varijable su odabrane na temelju prethodnih istraživanja koja potvrđuju njihovu relevantnost za procjenu eksplozivnosti, koordinacije i učinkovitosti izvedbe pokreta (Raeder i sur., 2015; Zhang i sur., 2013).

Morfološke varijable mjere se za potrebe kalibracije kinematičkog sustava *Xsens* (Slika 3.2).

Morfološke varijable:

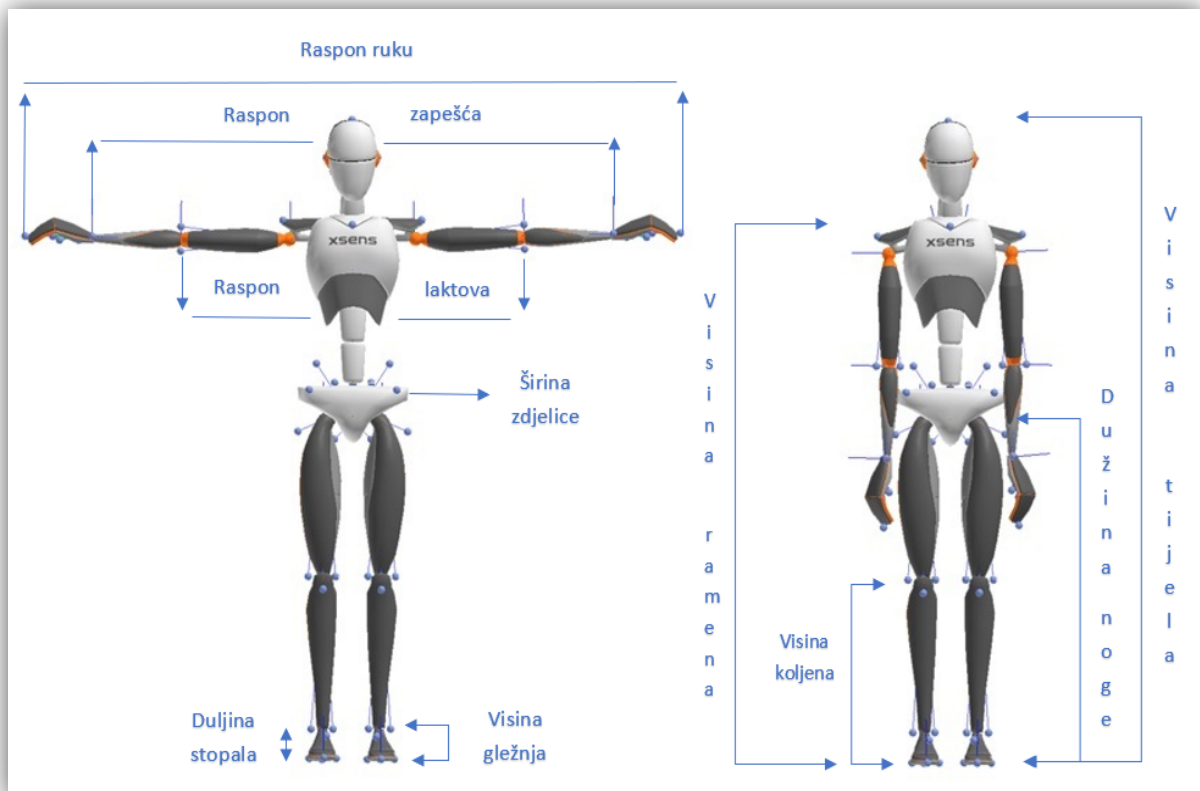
- Tjelesna visina (TV)
 - Vertikalna udaljenost od podloge do najviše točke glave u uspravnom položaju, koristi se za skaliranje segmenata tijela u kinematičkom modelu.
- Tjelesna masa (TM)
 - Tjelesna masa mjeri ukupnu težinu tijela, izražena je u kilogramima. Ova varijabla može utjecati na fizičku izvedbu i mehaniku pokreta, stoga je važna za razumijevanje tjelesne kompozicije i snage.
- Postotak tjelesne masti (% masti) – bioelektrična impedancija
 - Postotak tjelesne masti definira se kao udio masnog tkiva u ukupnoj tjelesnoj masi, određen metodom bioelektrične impedancije. Ovaj pokazatelj opisuje tjelesnu kompoziciju ispitanika, što može utjecati na mehanička svojstva tijela i ekonomičnost kretanja.

Raspon ruku (rasponR)

- Raspon ruku predstavlja vodoravnu udaljenost između vrhova srednjih prstiju lijeve i desne ruke u položaju maksimalno abduciranih gornjih ekstremiteta. Varijabla odražava ukupnu duljinu gornjih ekstremiteta i služi za skaliranje segmenata ramena, nadlaktice i podlaktice u kinematičkom modelu.
- Biakromijalni raspon (raspon: biak)
 - Biakromijalni raspon definira se kao udaljenost između lijeve i desne akromijalne točke ramenog pojasa. Ova mjera opisuje širinu ramena te je važna za određivanje položaja trupa i gornjih ekstremiteta pri kalibraciji *Xsens* sustava.
- Širina zdjelice (zdjelica_š)
 - Širina zdjelice mjeri se između najširih točaka zdjelčnih kostiju. Ova varijabla ima važan utjecaj na biomehaniku donjih ekstremiteta, kao i na prijenos opterećenja tijekom pokreta.
- Visina ramena (rame_v)
 - Visina ramena predstavlja okomitu udaljenost od podloge do akromijalne točke u uspravnom stavu. Ova mjera služi za određivanje vertikalnog položaja ramenog pojasa te za kalibraciju segmenata trupa i gornjih ekstremiteta.
- Dužina noge (noga)
 - Linearno mjerenje udaljenosti od referentne anatomske točke na zdjelici do razine pete, koje definira ukupnu duljinu donjeg ekstremiteta u kinematičkom modelu.
- Dužina stopala (stopalo)
 - Dužina stopala definira se kao udaljenost od stražnjeg ruba pete do najisturenije distalne točke prstiju. Ovaj parametar važan je za modeliranje kontakta stopala s podlogom te za određivanje položaja centra pritiska tijekom kretanja.
- Visina koljena (koljeno)
 - Visina koljena označava okomitu udaljenost od podloge do lateralne ili medijalne zglobove linije koljena, odnosno kondila femura. Varijabla

omogućuje precizno pozicioniranje zgloba koljena u kinematičkom modelu i poboljšava definiciju segmenata natkoljenice i potkoljenice.

- Visina gležnja (gležanj)
 - Visina gležnja definira se kao okomita udaljenost od podloge do lateralnog maleolusa, pri čemu se ovaj orijentir koristi kao reprezentativna točka skočnog zgloba. Ova mjera koristi se za određivanje položaja skočnog zgloba i za finu kalibraciju segmenta potkoljenice te dinamike dodira stopala s podlogom.



Slika 3.2. Prikaz mjerenih morfoloških varijabli

Promatrane varijable za analizu u istraživanju:

- Fiziološke varijable
 - FS (frekvencija srca)
 - Lak (koncentracija laktata u krvi)
 - SOU (subjektivni osjećaj umora)
- Kinematičke varijable
 - Tkont (ms) – trajanje kontakta s podlogom odraznog stopala

- Gležanj_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u skočnom zglobu odrazne noge
- Koljeno_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu koljena odrazne noge
- Kuk_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu kuka odrazne noge
- Rame_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu ramena šuterske ruke
- Lakat_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu lakta šuterske ruke
- Ručni_AVmax(°/s) – maksimalna kutna brzina u ručnom zglobu šuterske ruke
- Potk_Vmax (m/s) – maksimalna brzina potkoljenice odrazne noge
- Natk_Vmax (m/s) – maksimalna brzina natkoljenice odrazne noge
- Pelvis_Vmax(m/s) – maksimalna brzina zdjelice
- Rame_Vmax (m/s) – maksimalna brzina ramena šuterske ruke
- Nadl_Vmax (m/s) – maksimalna brzina nadlaktice šuterske ruke
- Podl_Vmax (m/s) – maksimalna brzina podlaktice šuterske ruke
- Šaka_Vmax (m/s) – maksimalna brzina šake šuterske ruke
- Šaka_VIS (cm) – maksimalna visina šake šuterske ruke
- Nat_VISmax (cm) – maksimalna visina natkoljenice zamašne noge
- Visina skoka (cm) – visina skoka
- Duljina skoka (cm) – duljina skoka
- Kuk_Amax (°) – maksimalni kut u zglobu kuka zamašne noge
- Kolj_Amax (°) – maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge
- Brzina leta lopte
 - Lopta_Vmax (km/h) – maksimalna brzina lopte nakon izbačaja
- Preciznost
 - PREC (cm) – preciznost šuta

Fiziološke varijable (FS, Lak, SOU) omogućuju procjenu unutarnjeg opterećenja organizma, što je ključno za razumijevanje utjecaja umora na biomehaničku izvedbu. Kombinacija objektivnih i subjektivnih mjera omogućuje višedimenzionalnu analizu, u skladu s preporukama suvremene sportske znanosti (Saw i sur., 2016). Frekvencija

srca (FS) kontinuirano se prati kao pokazatelj kardiovaskularnog odgovora na opterećenje te odražava razinu aktivacije autonomnog živčanog sustava tijekom i nakon protokola opterećenja. Koncentracija laktata u krvi (Lak) mjeri se kao pouzdan pokazatelj anaerobnog metaboličkog opterećenja, pri čemu povišene vrijednosti laktata upućuju na narušenu mišićnu homeostazu i moguće smanjenje živčano-mišićne učinkovitosti neophodne za izvedbu složenih tehničkih elemenata. Subjektivni osjećaj umora (SOU), kvantificiran validiranom skalom percipiranog opterećenja, dopunjuje objektivne pokazatelje integrirajući kognitivnu i perceptivnu dimenziju umora, što je osobito relevantno u kontekstu istraživanja u kojima fiziološki parametri sami po sebi ne opisuju u potpunosti cjelokupni doživljaj napora sportaša.

Kinematičke varijable u ovom istraživanju odabrane su s ciljem detaljne analize vremenskih, brzinskih i kutnih obilježja izvedbe skok šuta, pri čemu omogućuju uvid u strukturu pokreta i učinkovitost prijenosa sile kroz kinetički lanac.

Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (T_{kont}) mjeri se kao vremenski interval između trenutka inicijalnog dodira stopala i trenutka podizanja od podloge tijekom faze odraza skok šuta. Ova varijabla odražava sposobnost živčano-mišićnog sustava da u kratkom vremenskom intervalu generira impuls dovoljan za postizanje optimalne visine i duljine skoka. Kraće trajanje kontakta pri visokim izlaznim silama upućuje na veću eksplozivnost i reaktivnu snagu igrača, što je prepoznato kao ključna odrednica kvalitete odrazne faze u složenim acikličkim kretanjima. U kontekstu vremenske strukture skok šuta, trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom ujedno definira vremenski interval unutar kojeg moraju biti pokrenuti svi proksimalni impulsi koji se zatim sukcesivno prenose prema distalnim segmentima kinetičkog lanca, čime izravno uvjetuje redoslijed aktivacije cijelog pokreta.

Maksimalne kutne brzine zglobova ($Gležanj_AV_{max}$, $Koljeno_AV_{max}$, Kuk_AV_{max} , $Rame_AV_{max}$, $Lakat_AV_{max}$, $Ručni_AV_{max}$) predstavljaju vršne vrijednosti kutne brzine pojedinih zglobova tijekom izvedbe skok šuta, izražene u stupnjevima u sekundi ($^{\circ}/s$). Ove varijable opisuju brzinu rotacije zgloba unutar određenog stupnja slobode gibanja i temeljni su pokazatelji kinetičkog lanca koji se aktivira u proksimalno-distalnom smjeru, od zglobova trupa i donjih ekstremiteta prema distalnim segmentima šuterske ruke. Ključan aspekt ovih varijabli jest njihova međusobna vremenska organizacija – svaki distalniji zglob u kinetičkom lancu dostiže svoju maksimalnu kutnu brzinu s vremenskim pomakom u odnosu na proksimalniji zglob, što odražava mehanizam sekvencijalne aktivacije karakterističan za balistička

gibanja gornjeg ekstremiteta. Narušavanje tog vremenskog rasporeda – primjerice preuranjenom aktivacijom distalnih segmenata ili skraćanjem intervala između susjednih maksimuma – rezultira smanjenom učinkovitošću i nepotpunim prijenosom kinetičke energije prema lopti. Upravo stoga, analiza ne samo amplituda već i međusobnog vremenskog razmaka između pojedinih kutnih maksimuma, pruža uvid u stupanj koordinacijske prilagodbe na uvjete povišenog fiziološkog opterećenja.

Maksimalne linearne brzine pojedinih segmenata tijela (Potk_Vmax, Natk_Vmax, Rame_Vmax, Nadl_Vmax, Podl_Vmax, Šaka_Vmax), izražene u metrima u sekundi (m/s), opisuju translacijsku komponentu gibanja odabranih segmenata u trenutku dosezanja njihove najveće brzine tijekom izvedbe skok šuta. Navedene varijable izravno opisuju princip proksimalno-distalne sumacije brzina, prema kojemu se kinetička energija generirana u proksimalnim segmentima postupno prenosi i povećava prema distalnim dijelovima kinetičkog lanca, dosežući najveće vrijednosti u brzini šake kao posljednje karike toga lanca. U okviru proksimalno-distalne sekvencijalne aktivacije, svaki distalniji segment kinetičkog lanca dostiže svoju vršnu brzinu s određenim vremenskim pomakom u odnosu na proksimalniji segment, pri čemu veličina toga pomaka izravno odražava stupanj koordinacijske usklađenosti i učinkovitost prijenosa kinetičke energije prema distalnim segmentima. Skraćivanje tih vremenskih intervala, primjerice uslijed umora, upućuje na narušavanje sekvencijalnog obrasca aktivacije te se može manifestirati kao mjerljivo smanjenje brzine šake, a posljedično i brzine lopte, što predstavlja jednu od središnjih pretpostavki ovog istraživanja.

Visina šake šuterske ruke u trenutku izbačaja (Šaka_VIS) i maksimalna visina natkoljenice zamašne noge (Natk_VISmax), izražene u centimetrima, opisuju prostorni položaj ključnih segmenata tijela u vertikalnoj ravnini tijekom izvedbe skok šuta. Visina skoka i duljina skoka opisuju prostorne karakteristike balističke putanje igrača u fazi leta te su pokazatelji ukupnog mehaničkog učinka odrazne faze, pri čemu su obje varijable vremenski određene kvalitetom prethodno opisanog sekvencijalnog impulsa u fazi kontakta s podlogom. Veća visina šake u trenutku izbačaja povećava efektivni kut putanje lopte prema голу i otežava reakciju vratara, dok duljina skoka odražava horizontalnu komponentu gibanja i taktičku orijentaciju izvedbe.

Maksimalni kut u zglobu kuka zamašne noge (Kuk_Amax) i maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge (Kolj_Amax), izraženi u stupnjevima (°), opisuju amplitudu pokreta u navedenim zglobovima te neizravno ukazuju na opseg kutnog

gibanja koji prethodi akceleracijskoj fazi zamašne noge. U okviru proksimalno-distalne sekvencijalne analize, ovi kutovi definiraju početne uvjete iz kojih se generira zamašni impuls, a njihove promjene pod utjecajem umora mogu se interpretirati kao kompenzacijski mehanizmi kojima organizam nastoji održati prostornu organizaciju pokreta unatoč smanjenom kapacitetu živčano-mišićnog sustava za vremenski preciznu koordinaciju segmenata.

Odabrane varijable temelje se na provjerenim biomehaničkim modelima kinematičke analize pokreta, pri čemu je posebna pozornost posvećena segmentima koji sudjeluju u generiranju sile i preciznosti šuta. Prema teoriji motoričkog programa (Schmidt i Lee, 2011), pokret se izvodi prema unaprijed pohranjenim obrascima, a varijable poput Šaka_Vmax i Rame_AVmax odražavaju završnu fazu toga programa.

Radi sustavnijeg prikaza i lakšeg razumijevanja uloge pojedinih varijabli unutar cjelovite strukture pokreta, opisane kinematičke varijable razvrstane su prema fazama izvedbe skok šuta. Takva podjela odražava prirodnu sekvencijalnost pokreta te omogućuje preciznije povezivanje mjerenih parametara s biomehaničkim zahtjevima svake pojedine faze – zaleta, odraza, leta i izbačaja lopte i faze doskoka. Navedena fazna klasifikacija nije isključivo opisne naravi, već ima i analitičku funkciju – promatrajući promjene pojedinih varijabli unutar specifičnog vremenskog intervala svake faze, moguće je identificirati u kojoj točki kinetičkog lanca umor najizraženije narušava koordinacijsku strukturu pokreta. Podjela varijabli po fazama tako predstavlja metodološki okvir koji omogućuje ciljanu interpretaciju rezultata i doprinosi razumijevanju mehanizama kojima fiziološko opterećenje mijenja prostornu i vremensku organizaciju skok šuta kao složenog gibanja.

U fazi zaleta promatrana je varijabla maksimalne brzine zdjelice (Pelvis_Vmax) (m/s). U fazi odraza promatrane su varijable donjih ekstremiteta (odrazna noga): maksimalna kutna brzina u skočnom zglobu odrazne noge (Gležanj_AVmax) (°/s), maksimalna kutna brzina u zglobu koljena odrazne noge (Koljeno_AVmax) (°/s), maksimalna kutna brzina u zglobu kuka odrazne noge (Kuk_AVmax) (°/s), trajanje kontakta s podlogom odrazne noge (Tkont) (ms), maksimalna brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax) (m/s), maksimalna brzina potkoljenice odrazne noge (Potk_Vmax) (m/s). U fazi leta i izbačaja lopte promatrani su parametri dominantne strane tijela (dominantne šuterske ruke): maksimalna brzina ramena (Rame_Vmax) (m/s), maksimalna brzina nadlaktice (Nadl_Vmax) (m/s), maksimalna brzina podlaktice (Podl_Vmax) (m/s); maksimalna brzina šake (Šaka_Vmax) (m/s); maksimalna kutna

brzina u zglobu ramena (Rame_AVmax) ($^{\circ}/s$), maksimalna kutna brzina u zglobu lakta (Lakat_AVmax) ($^{\circ}/s$), maksimalna kutna brzina ručnog zgloba (Ručni_AVmax) ($^{\circ}/s$), maksimalna visina šake (Šaka_VIS) (cm), maksimalna visina natkoljenice zamašne noge (Natk_VISmax) (cm), maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge (Kolj_Amax) ($^{\circ}$), maksimalni kut u zglobu kuka zamašne noge (Kuk_Amax) ($^{\circ}$), visina skoka (cm) i duljina skoka (cm). Nakon faze izbačaja mjerene su brzina lopte (Lopta_Vmax) (km/h) i preciznost šuta (PREC) (cm).

Faza zaleta (Slika 3.3.)

Pelvis_V_{max} (m/s) – maksimalna brzina zdjelice



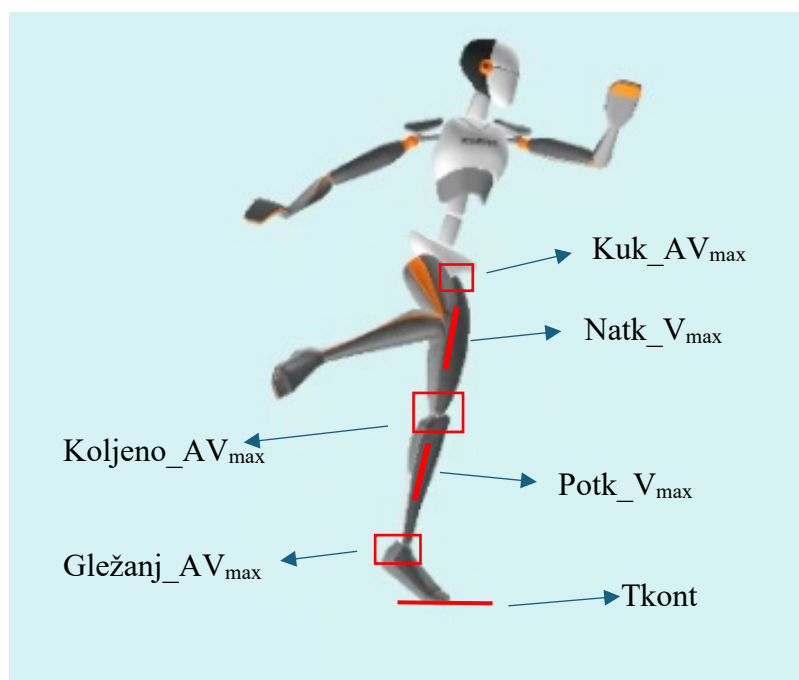
Slika 3.3. Kinogram izvedbe skok šuta – faza zaleta

U fazi zaleta promatrana je maksimalna brzina zdjelice (Pelvis_Vmax), izražena u metrima u sekundi (m/s). Zalet predstavlja pripremnu fazu skok šuta u kojoj igrač generira horizontalni impuls koji se zatim pretvara u vertikalnu i rotacijsku komponentu gibanja tijekom odraza i leta. Zdjelica kao središnji segment tijela, anatomski smještena između donjih ekstremiteta i trupa, u ovoj fazi preuzima ulogu primarnog nositelja kinetičke energije akumulirane tijekom zaleta. Maksimalna brzina zdjelice odabrana je kao mjerna varijabla jer predstavlja početni pokazatelj proksimalno-

distalne sumacije brzina – ona je prvi segment u kinetičkom lancu čija brzina dostiže svoj maksimum i koji se zatim sukcesivno prenosi prema trupu, ramenu i distalnim segmentima šuterske ruke. Visoka vrijednost Pelvis_Vmax upućuje na učinkovitu pretvorbu horizontalnog impulsa zaleta u inicijalni pogon kinetičkog lanca, dok njezino smanjenje pod utjecajem umora može narušiti sve naknadne faze sekvencijalne aktivacije segmenata i time izravno utjecati na brzinu lopte kao krajnji izvedbeni ishod skok šuta.

Faza odraza (Slika 3.4.)

1. Gležanj_AV_{max}(°/s) – maksimalna kutna brzina u skočnom zglobu odrazne noge
2. Koljeno_AV_{max}(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu koljena odrazne noge
3. Kuk_AV_{max}(°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu kuka odrazne noge
4. Tkont (ms) – trajanje kontakta s podlogom
5. Natk_V_{max} (m/s) – maksimalna brzina natkoljenice odrazne noge
6. Potk_V_{max} (m/s) – maksimalna brzina potkoljenice odrazne noge



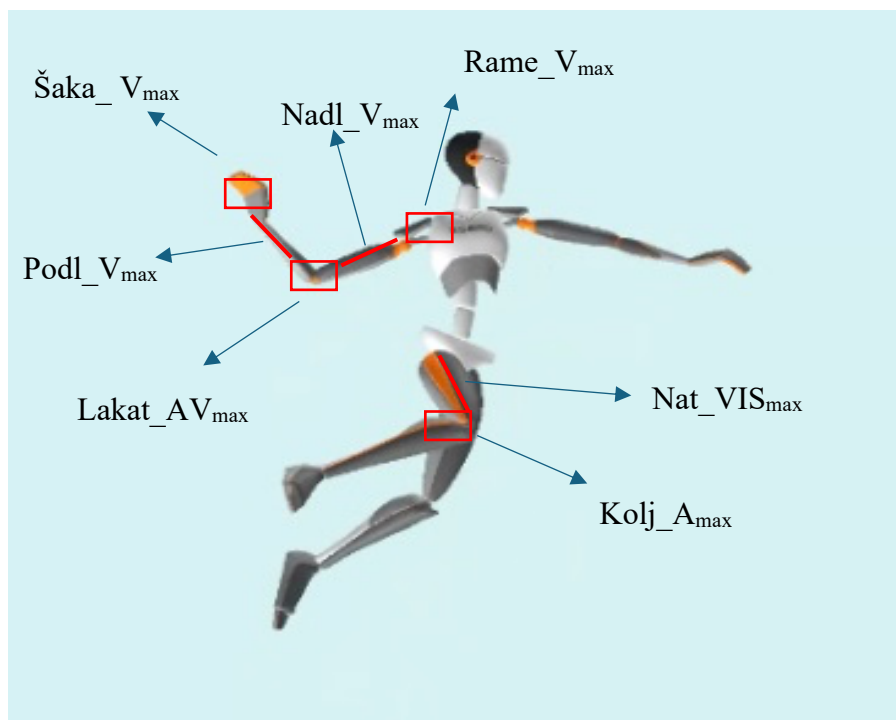
Slika 3.4. Kinogram izvedbe skok šuta – faza odraza

Faza odraza predstavlja biomehanički najzahtjevniju fazu skok šuta u kojoj se horizontalni impuls generiran zaletom transformira u vertikalnu komponentu gibanja tijela. Upravo u ovoj fazi dolazi do integracije svih prethodno akumuliranih mehaničkih impulsa od eksplozivne ekstenzije zglobova odrazne noge do zamašnog doprinosa

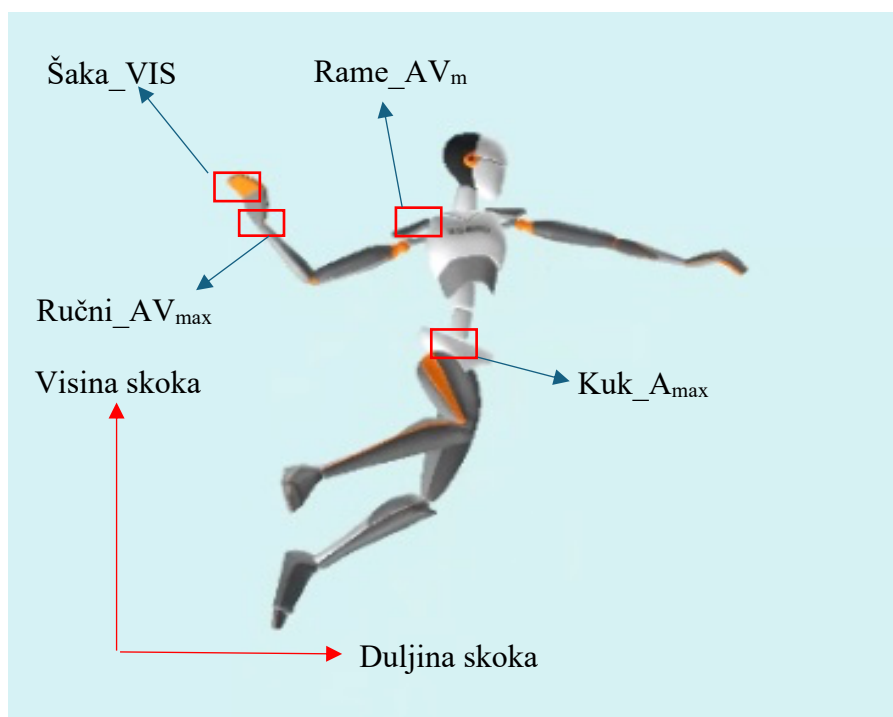
slobodnog ekstremiteta. Pri tome njihova međusobna vremenska i prostorna usklađenost izravno determinira kvalitetu leta i preduvjete za učinkovit izbačaj lopte. Odabrane varijable ove faze obuhvaćaju kutne brzine zglobova odrazne noge, trajanje kontakta s podlogom te linearne brzine segmenata odrazne noge, čime zajedno čine cjelovit kinematički profil odraza koji omogućuje kvantifikaciju eksplozivnosti, sekvencijalne koordinacije i vremenskih karakteristika ove faze skok šuta. U kontekstu istraživanja utjecaja umora, upravo je faza odraza posebno osjetljiva na pad živčano-mišićne učinkovitosti, s obzirom da zahtijeva visoku razinu sinkronizacije između odrazne i zamašne noge unutar iznimno kratkog vremenskog perioda kontakta s podlogom.

Faza leta i izbačaja lopte (Slika 3.5. i Slika 3.6.)

1. Rame_ $V_{\max}$ (m/s) – maksimalna brzina ramena šuterske ruke
2. Nadl_ $V_{\max}$ (m/s) – maksimalna brzina nadlaktice šuterske ruke
3. Podl_ $V_{\max}$ (m/s) – maksimalna brzina podlaktice šuterske ruke
4. Natk_ $VIS_{\max}$ (cm) – maksimalna visina natkoljenice zamašne noge
5. Kolj_ $A_{\max}$ (°) – maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge
6. Kuk_ $A_{\max}$ (°) – maksimalni kut u zglobu kuka zamašne noge
7. Šaka_ $V_{\max}$ (m/s) – maksimalna brzina šake šuterske ruke
8. Rame_ $AV_{\max}$ (°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu ramena šuterske ruke
9. Lakat_ $AV_{\max}$ (°/s) – maksimalna kutna brzina u zglobu lakta šuterske ruke
10. Ručni_ $AV_{\max}$ (°/s) – maksimalna kutna brzina u ručnom zglobu šuterske ruke
11. Šaka_ VIS (cm) – maksimalna visina šake šuterske ruke
12. Duljina skoka (cm) – duljina skoka
13. Visina skoka (cm) – visina skoka



Slika 3.5. Kinogram izvedbe skok šuta – faza leta i izbačaja lopte (1)



Slika 3.6. Kinogram izvedbe skok šuta – faza leta i izbačaja lopte (2)

Faza leta i izbačaja lopte predstavlja završnu i izvedbeno najsloženiju fazu skok šuta. U toj fazi svi prethodno generirani mehanički impulsi integriraju se u koordinirani pokret gornjeg ekstremiteta s ciljem postizanja maksimalne brzine i optimalne

preciznosti izbačaja lopte. Za razliku od prethodnih faza, u kojima dominira uloga donjih ekstremiteta, ova faza stavlja težište na sekvencijalnu aktivaciju segmenata šuterske ruke te na prostorne karakteristike položaja tijela u trenutku izbačaja. Odabrane varijable obuhvaćaju linearne i kutne brzine segmenata šuterske ruke, visinske i kutne parametre ključnih segmenata tijela te prostorne karakteristike skoka. Zajedno tvore sveobuhvatan kinematički profil koji opisuje kako kvalitetu samog leta, tako i mehaničke preduvjete za učinkovit izbačaj lopte. Visina i duljina skoka pritom definiraju prostorni okvir unutar kojeg se odvija cijela faza, dok kutni i visinski parametri zamašne noge opisuju prostornu organizaciju slobodnog ekstremiteta koji posredno doprinosi stabilizaciji tijela i optimalnom pozicioniranju šuterske ruke u trenutku izbačaja. U kontekstu istraživanja utjecaja umora, ova faza posebno je analitički vrijedna jer moguće promjene u vremenskom rasporedu brzinskih maksimuma segmenata šuterske ruke – od ramena prema šaci – izravno ukazuju na to u kojoj je mjeri narušen sekvencijalni koordinacijski obrazac koji je neophodan za učinkovitu realizaciju skok šuta.

Završna faza

1. Lopta_ $V_{\max}$ (km/h) – maksimalna brzina lopte nakon izbačaja
2. PREC (cm) – preciznost šuta

Završna faza skok šuta obuhvaća trenutak izbačaja lopte i neposredni ishod šuterske akcije, pri čemu se dvije odabrane varijable – maksimalna brzina lopte (Lopta_ $V_{\max}$) i preciznost šuta (PREC) – mogu smatrati krajnjim izvedbenim pokazateljima učinkovitosti cjelokupnog prethodnog kinematičkog lanca. Za razliku od varijabli prethodnih faza koje opisuju mehanička obilježja pojedinih segmenata tijela, ove dvije varijable integriraju ukupan doprinos svih faza pokreta u jedan mjerljiv ishod, čime predstavljaju temeljne kriterijske varijable ovog istraživanja. Brzina lopte, kao rezultanta sekvencijalne sumacije brzina putem kinetičkog lanca, te preciznost šuta, kao pokazatelj prostorne kontrole izbačaja, zajedno omogućuju procjenu u kojoj mjeri kinematičke promjene uzrokovane umorom imaju stvarne posljedice na situacijsku učinkovitost igrača. Upravo kombinacija ovih dviju varijabli omogućuje razlikovanje između promjena koje su mjerljive na razini kinematike pojedinih segmenata, ali situacijski nevažne, i onih koje se izravno odražavaju na smanjenje brzine ili narušavanje preciznosti šuta kao ključnih čimbenika uspješnosti realizacije u rukometu.

3.3. Mjerni instrumenti

Za provedbu istraživanja korišteni su sljedeći instrumenti i protokoli:

- Xsens MVN sustav za kinematičku analizu
- Optojump Next sustav za mjerenje kontakta s podlogom
- Polar H10 za mjerenje srčane frekvencije
- Lactate Scout 3 za mjerenje koncentracije laktata
- Stalker ATS II radar za mjerenje brzine lopte
- Panasonic GH5, *high speed* kamera (180 fps)
- Kinovea softver za video analizu preciznosti šuta
- Borgova skala za subjektivnu procjenu umora.

Sustavom Xsens MVN provedena je kinematička analiza pokreta te su izmjerene sve linearne brzine segmenata tijela (Pelvis_Vmax, Natk_Vmax, Potk_Vmax, Rame_Vmax, Nadl_Vmax, Podl_Vmax, Šaka_Vmax), kutne brzine zglobova (Gležanj_AVmax, Koljeno_AVmax, Kuk_AVmax, Rame_AVmax, Lakat_AVmax, Ručni_AVmax), visinski parametri segmenata (Šaka_VIS, Nat_VISmax), maksimalni kutovi zglobova (Kuk_Amax, Kolj_Amax) te prostorna karakteristika skoka (visina skoka).

Ovaj sustav sastoji se od hardverskog i softverskog paketa. Hardverski paket obuhvaća 17 senzora za mjerenje lokomocije i pokreta (Slika 3.7.) te stanicu za napajanje senzora i primanje podataka iz pojedinog senzora (Slika 3.8). Zhang i sur. (2013) utvrdili su valjanost (koeficijent višestruke korelacije / KVK>0,96) Xsens sustava za mjerenje kutnih odnosa u svim zglobovima donjih ekstremiteta. Također, utvrđene su dobre metrijske karakteristike te mogućnost primjene kinematičkog sustava u sportskim igrama (Robert-Lachaine i sur., 2017; Jung i sur., 2010).



Slika 3.7. Senzor za mjerenje kinematičkih parametara i prijenos podataka

Svaki senzor teži 16 grama i malih je dimenzija (43 × 30 × 13 mm), što omogućuje nesmetanu izvedbu različitih motoričkih zadataka u specifičnim uvjetima.

Brzina prijenosa podataka kreće se u rasponu od 60 do 120 Hz, ovisno o broju korištenih jedinica. Svaki senzor ima interno napajanje (bateriju) koje pri kontinuiranoj upotrebi može trajati do 6 sati. Tijekom provedbe mjerenja, odnosno prikupljanja podataka, naredba za početak i kraj snimanja izvodi se putem računala u programskom paketu proizvođača. Sensori bežično prenose podatke do stanice za sinkronizaciju, koja je žičanim putem povezana s računalom. Navedena stanica koristi se i za punjenje senzora te za nadogradnju ugrađenih programa.



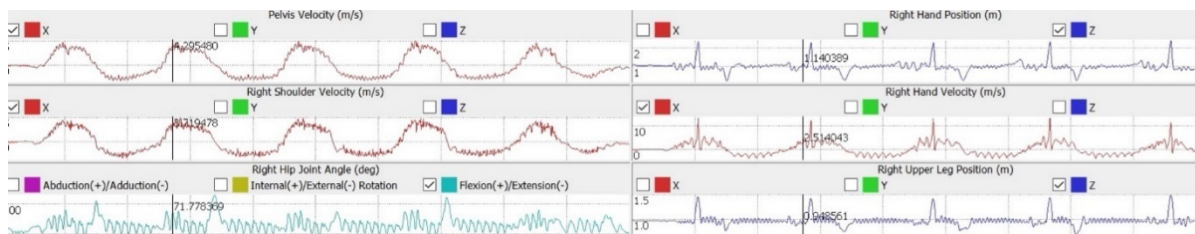
Slika 3.8. Stanica za primanje kinematičkih podataka i prijenos prema računalu

Prije početka postavljanja senzora na tijelo, ispitanik oblači *Xsens* majicu na koju se postavljaju 3 senzora. Ostatak senzora (14 senzora) postavlja se uz pomoć traka za pričvršćivanje. Sensori se postavljaju na sljedeće segmente tijela: glava, lijevo rame, desno rame, lijeva nadlaktica, desna nadlaktica, lijeva podlaktica, desna podlaktica, lijeva šaka, desna šaka, prsna kost, zdjelica, lijeva natkoljenica, desna natkoljenica, lijeva potkoljenica, desna potkoljenica, lijevo stopalo, desno stopalo (Slika 3.9).



Slika 3.9. Prikaz pozicija senzora na tijelu ispitanika

Za analizu podataka iz kinematičkog odijela koristio se MVN BIOMECH programski paket (Xsens MVN Analyze 2019, Verzija 2019.0.0 build 1627, datum: Fri Oct 19 2018) (Slika 3.10. i Slika 3.11.)



Slika 3.10. Programski prikaz kinematičke analize u Xsens sustavu



Slika 3.11. Grafički prikaz kinematičke analize u Xsens sustavu

Kalibracija sustava ima za cilj povezivanje mjera ispitanika, položaja senzora na tijelu te definiranje položaja tijela u prostoru (Slika 3.12). S obzirom na specifičnost pokreta i važnost prostorno-vremenskih parametara, za potrebe ovog istraživanja provodila se kalibracija koja se sastoji od faze mirnog stajanja u mjestu te hodanja prema naprijed, okreta i hoda natrag do početne pozicije, koju je potrebno zadržati još 20 sekundi (Schepers i sur., 2018). Nakon postupka kalibracije provodi se provjera postavljenosti senzora jednostavnim pokretima podizanja ruku i nogu, čime se utvrđuje jesu li senzori pravilno postavljeni i je li kalibracija sustava uspješno provedena.



Slika 3.12. Prikaz kalibracije sustava tijekom provođenja testiranja

Primjena sustava *Xsens* MVN za kinematičku analizu pokreta pokazala se iznimno pouzdanom u sportskim uvjetima, osobito pri analizi složenih pokreta cijelog tijela. Zhang i sur. (2013) izvještavaju o vrlo visokoj korelaciji između mjerenja dobivenih sustavom *Xsens* i referentnih optičkih sustava ($CMC > 0,96$), čime se potvrđuje njegova mjerna valjanost u sportskom kontekstu. Sustav *Xsens* MVN koristi mrežu od 17 inercijskih senzora koji omogućuju trodimenzionalnu rekonstrukciju pokreta cijelog tijela, pružajući detaljan uvid u prostorne i vremenske karakteristike gibanja. Robert-Lachaine i sur. (2017) dodatno ističu da je sustav validiran za mjerenje kutnih brzina i amplituda pokreta u stvarnim uvjetima, što ga čini osobito pogodnim za primjenu u dinamičnim sportovima poput rukometa, u kojima su brze promjene smjera, skokovi i rotacije ključne sastavnice uspješne izvedbe.

Kinematički parametri odraza (trajanje kontakta s podlogom i duljina skoka) mjereni su sustavom Optojump Next (Slika 3.13). Taj sustav sastoji se od paralelnih ćelija koje u međusobnoj interakciji mjere parametre na temelju aktivnosti koje se odvijaju u prostoru između njih. Glatthorn i sur. (2011) utvrdili su mjerne karakteristike toga uređaja: valjanost ($ICC = 0,997 - 0,998$) potvrđena je usporedbom s platformom za mjerenje sile reakcije podloge, a rezultati test-retest pouzdanosti ukazuju na visoku korelaciju između provedenih mjerenja ($ICC = 0,982 - 0,989$).



Slika 3.13. Optojump_next sustav za mjerenje parametara kontakta stopala s podlogom

U istraživanju provedenom na 14 rukometašica (Trofin i Honceriu, 2017) sustav Optojump primijenjen je za usporedbu mjerenja eksplozivne snage donjih ekstremiteta (visine skoka) između dva mjerna sustava – Just Jump (kontaktna podloga) i Optojump (optički sustav) – s ciljem izrade korekcijske jednadžbe za Just Jump u odnosu na visokoprecizni referentni sustav. Polazeći od pretpostavke da Just Jump sustavno procjenjuje visinu skoka u odnosu na Optojump, autori su pokazali da se mjere visine skoka i snage dobivene sustavom Optojump dobro podudaraju s referentnim sustavom te da se rezultati sustava Just Jump mogu matematički korigirati pomoću jednadžbi utemeljenih na Optojump mjerenjima. Optojump je optički sustav koji se sastoji od par letvica postavljenih na podlogu, međusobno povezanih LED diodama; sustav bilježi svaki prekid svjetlosne komunikacije, primjerice pri odrazu ili doskoku sportaša, čime omogućuje precizno mjerenje visine skoka, vremena kontakta s podlogom, duljine koraka i drugih parametara s preciznošću do tisućinke sekunde. Njegova prenosivost omogućuje testiranje u stvarnim uvjetima na terenu i praćenje specifičnih rukometnih kretnji, a visoka pouzdanost potvrđena u istraživanju Glatthorn i sur. (2011), zajedno s konzistentnim test-retest rezultatima, čini Optojump posebno pogodnim za kvantifikaciju eksplozivnih pokreta u sportovima s čestim skokovima i promjenama smjera. Unatoč visokoj razini laboratorijske validacije, pojedini autori naglašavaju važnost provjere u stvarnim sportskim uvjetima, gdje se mogu pojaviti varijacije u izvedbi, interferencije s opremom i utjecaj vanjskih čimbenika (Linke i sur., 2018; Baldinger i sur., 2024). U tom kontekstu, Luteberget i sur. (2023) predlažu primjenu referentnih sustava, poput optoelektroničkih kamera ili platformi za mjerenje sile reakcije podloge, kao dodatnu provjeru točnosti kinematičkih mjerenja. Takav pristup

omogućuje višedimenzionalnu validaciju i povećava pouzdanost rezultata u kontekstu primijenjene sportske biomehanike.

Primjena sustava *Xsens MVN* i *Optojump Next* omogućuje preciznu kvantifikaciju pokreta u sportskim uvjetima. Oba sustava temelje se na naprednim inercijskim i optičkim načelima mjerenja, što omogućuje analizu prostorno-vremenskih parametara pokreta s visokom razinom pouzdanosti. Valjanost ovih sustava potvrđena je u prethodnim istraživanjima (Schepers i sur., 2018; Glatthorn i sur., 2011), čime se osigurava objektivnost i znanstvena utemeljenost dobivenih podataka.

Frekvencija srca mjerena je uređajem za praćenje srčane frekvencije (Polar H10, Polar, Kempele, Finska), a koncentracija laktata prenosivim laktatomjerom (Lactate Scout 3, SensLab GmbH, Leipzig, Njemačka) (Slika 3.14. i Slika 3.15.).



Slika 3.14. Prikaz mjernog instrumenata za mjerenje frekvencije srca



Slika 3.15. Prikaz mjernog instrumenata za mjerenje koncentracije laktata

Polar H10 srčani senzor u posljednjih je nekoliko godina postao standard u praćenju srčane frekvencije u uvjetima visokog intenziteta, kakvi su tipični za rukomet. Njegova ključna prednost jest visoka točnost mjerenja temeljena na EKG tehnologiji (prsni remen s elektrodama), zahvaljujući kojoj može pouzdano registrirati svaki otkucaj srca, čak i tijekom naglih promjena tempa, kontakta s protivnikom i čestih promjena smjera kretanja. U rukometu, sportu kojega obilježavaju eksplozivni sprintovi, skok šutovi i agresivna obrana, upravo je takva stabilnost signala nužna za kvalitetno praćenje unutarnjeg opterećenja igrača. Dodatna važna funkcija senzora Polar H10 jest integracija s različitim sustavima za praćenje opterećenja. Senzor se

može bežično povezati sa sportskim satovima, mobilnim aplikacijama ili timskim sustavima (npr. Polar Team Pro), koji u stvarnom vremenu prikazuju srčanu frekvenciju svih igrača na zaslonu tableta ili računala. Time je omogućeno praćenje intenziteta treninga u zonama srčane frekvencije za cijelu momčad – primjerice, koliko je vremena pojedini igrač proveo iznad 90 % svojih maksimalnih vrijednosti, što se često koristi kao pokazatelj visokog anaerobnog opterećenja. Valjanost senzora Polar H10 za precizno mjerenje srčane frekvencije potvrđena je u više znanstvenih istraživanja. Schaffarczyk i sur. (2022) usporedili su mjerenja uređaja Polar H10 s referentnim elektrokardiogramom (EKG) pri mirovanju i tijekom vježbanja rastućeg intenziteta. Rezultati su pokazali visoku podudarnost između dvaju sustava za vrijednosti srčane frekvencije i linearne parametre varijabilnosti srčane frekvencije (HRV), uz zanemariva odstupanja pri svim intenzitetima opterećenja. Autori stoga preporučuju primjenu uređaja Polar H10 za praćenje navedenih parametara u sportskoj praksi. Navedeni rezultati potvrđuju da se H10 može pouzdano koristiti ne samo za osnovno praćenje srčane frekvencije već i za naprednije analize autonomne regulacije i praćenja umora u kontekstu momčadskih sportova, uključujući rukomet.

Laktatomjer je prijenosni uređaj za mjerenje koncentracije laktata u krvi iz malog uzorka kapilarne krvi (najčešće iz jagodice prsta ili ušne resice), uz primjenu jednokratnih test-traka i enzimske reakcije koju analizator očitava elektrokemijskim ili fotometrijskim postupkom. U znanstvenim istraživanjima koristi se za kvantifikaciju unutarnjeg opterećenja tijekom tjelesne aktivnosti, određivanje laktatnog praga i praćenje učinaka treninga radi usporedbe između protokola, skupina ili vremenskih točaka mjerenja. Crotty i sur. (2021) utvrdili su valjanost i pouzdanost uređaja Lactate Pro 2, koji je pokazao visoku pouzdanost među uređajima i dobro podudaranje s laboratorijskim analizatorom YSI 1500 Sport u širokom rasponu koncentracija laktata. Sustav Lactate Scout primijenjen je i u istraživanju u kojem je uspoređivana anaerobna izdržljivost vrhunskih rukometaša, košarkaša i nogometaša (Sporiš i sur., 2014). Na uzorku od 150 ispitanika zaključeno je da sva tri navedena sporta u visokoj mjeri ovise o anaerobnoj izdržljivosti, pri čemu se anaerobni zahtjevi razlikuju po razini i strukturi ovisno o specifičnostima pojedinog sporta.

Antropometrijske karakteristike mjerene su mjernom trakom sustava *Xsens* MVN te prijenosnim visinomjerom (SECA 213, Hamburg, Njemačka). Za mjerenje postotka masnog tkiva i tjelesne mase ispitanika korištena je vaga TANITA BC-545N (TANITA, Amsterdam, Nizozemska) (Slika 3.16.).



Slika 3.16. Prikaz vage (BC-545n) za mjerenje morfoloških karakteristika

Brzina lopte (IHF, službena lopta veličine 3, opsega 59 cm) mjerena je radarom za mjerenje brzine (Stalker ATS II, Stalker Sport, Texas, SAD) (Slika 3.17. i 3.18).

Radar za mjerenje brzine omogućio je objektivno prikupljanje podataka o brzini izbačaja pri izvođenju skok šuta. Pouzdanost radara kao mjernog instrumenta u kontekstu mjerenja brzine bacanja potvrđena je u istraživanju Van den Tilaara i Marquesa (2013). U navedenom istraživanju autori su ispitivali konzistentnost mjerenja brzine bacanja medicinskih lopti različitih masa u sjedećem položaju (izbačaj s visine prsa) i u stojećem bacanju iznad glave, primjenjujući Doppler radar kao mjerni instrument. 79 ispitanika izvodilo je višestruka bacanja s lopticama mase 1, 3 i 5 kilograma. Analiza pouzdanosti pokazala je da radar postiže visoke intraklasne koeficijente korelacije ($ICC = 0,88 - 0,96$), što upućuje na to da ponovljena mjerenja dosljedno daju slične vrijednosti. Iako su tehnika bacanja i masa lopte utjecale na varijabilnost izvedbe, radar kao mjerni instrument pokazao je visok stupanj mjerne stabilnosti, čime je opravdana njegova primjena u istraživanjima bacačkih gibanja.



Slika 3.17. Prikaz lopte korištene u testiranju



Slika 3.18. Prikaz radara kojim se mjerila brzina lopte u testiranju

Preciznost je mjerena dvjema kamerama s mogućnošću snimanja velikog broja slika u sekundi (Panasonic GH5, 180 fps), od kojih je jedna bila postavljena u frontalnoj ravnini s golom, a druga u poprečnoj ravnini. Sinkronizacijom snimaka obiju kamera moguće je točno utvrditi trenutak prolaska lopte preko golmanske crte. U tome trenutku mjerena je udaljenost lopte od idealne pozicije, odnosno označene pozicije pri pogotku u desni ili lijevi gornji kut gola. Udaljenost od stativne i prečke po osi X i osi Y mjerena je u programskom alatu Kinovea (v. 0.8.15), u kojemu se nakon kalibracije svakog šuta utvrđivala udaljenost u centimetrima (Slika 3.19.). Pri mjerenju trakama označeni su gornji lijevi i desni prostor koje su ispitanici morali pogoditi. Ispitanici kojima je desna ruka šuterska, gađali su gornji desni kut; a ispitanici kojima je lijeva ruka šuterska, gađali su gornji lijevi kut u odnosu na smjer zaleta. Prostor za pogodak bio je omeđen trakom vidljive boje na udaljenosti 40 cm po osi X i osi Y gola.

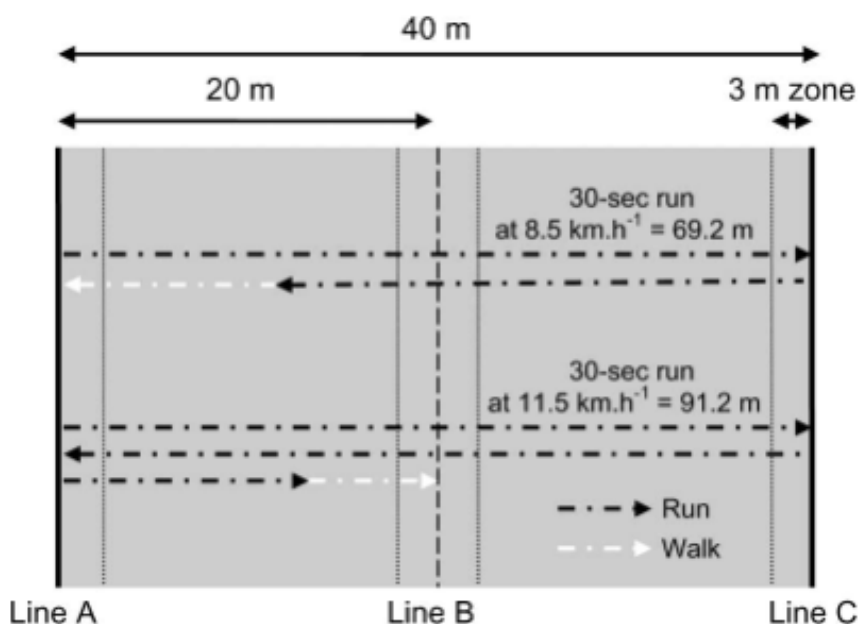


Slika 3.19. Prikaz analize preciznosti šuta u Kinovea softverskom paketu

Opisani postupak mjerenja preciznosti šuta u skladu je s metodološkim pristupima prethodnih istraživanja u kojima je preciznost operacionalizirana kao prostorna pogreška između stvarnog i ciljnog mjesta udarca lopte, pri čemu su korišteni video analiza i označavanje ciljnih zona vidljivim oznakama na голу (Nuño i sur., 2016; van den Tillaar, 2020).

Pouzdanost mjernih sustava ovisi o pravilnoj kalibraciji, pozicioniranju senzora i dosljednosti protokola mjerenja. U ovom istraživanju provedena je višefazna kalibracija sustava *Xsens*, uključujući statičku i dinamičku komponentu, čime je osigurana precizna rekonstrukcija pokreta. Sustav *Optojump* postavljen je paralelno s mjernom zonom, uz kontrolu ambijentalnih uvjeta i standardizaciju položaja ispitanika, čime je smanjen utjecaj vanjskih varijabli. Kombinacija objektivnih biomehaničkih mjerenja (*Xsens*, *Optojump*) s fiziološkim pokazateljima (FS, Lak, SOU) omogućuje integrirani pristup analizi sportske izvedbe. Valjanost primijenjenih sustava osigurava da dobiveni podaci odražavaju stvarne promjene u motoričkoj izvedbi pod utjecajem umora, čime se doprinosi znanstvenoj pouzdanosti i praktičnoj primjenjivosti rezultata. Pri tome, valjanost mjernih sustava poput *Xsensa* i *Optojumpa* mora se promatrati u kontekstu referentnih tehnologija i uvjeta mjerenja (Linke i sur., 2018; Luteberget i sur., 2023).

Za protokol opterećenja primijenjen je progresivni diskontinuirani test do otkaza – 30-15 *Intermittent Fitness Test* (Slika 3.20.) (Buchheit, 2008). Navedeni test standardizirani je terenski protokol namijenjen procjeni maksimalne aerobne brzine i sposobnosti ponavljanja visokointenzivnih napora u intermitentnim sportovima. Test se sastoji od intervala trčanja u trajanju od 30 sekundi praćenih pasivnim ili vrlo laganim oporavkom u trajanju od 15 sekundi. Brzina kretanja progresivno se povećava sve do otkaza, odnosno dok ispitanik više nije u stanju pratiti zadani ritam. Intenzitet i ritam trčanja unaprijed su zadani zvučnim signalima te se provode na označenoj dionici, što omogućuje preciznu kontrolu opterećenja i usporedivost rezultata između ispitanika. Test se prekida kada ispitanik tri puta uzastopno ne uspije pravovremeno stići do označene zone udaljene 3 metra.



Slika 3.20. Prikaz protokola iscrpljivanja, prema Bucheit (2008)

Za procjenu subjektivnog pokazatelja umora primijenjena je Borgova skala omjera kategorija s 10 stupnjeva – CR-10 (Borg, 1982), koja predstavlja standardizirano sredstvo za mjerenje individualnog doživljaja napora, zadihanosti i razine opterećenja tijekom tjelesne aktivnosti (Williams, 2017). Borgova skala percipiranog napora (RPE) izvorno je razvijena od strane Borga (1982) te predstavlja standardizirani instrument za procjenu subjektivnog doživljaja opterećenja. Noviji autori, poput Williamsa (2017), ne odnose se na njezino autorstvo, već na primjenu i validaciju u suvremenim istraživanjima. Skala omogućuje kvantifikaciju subjektivnog doživljaja napora numeričkim kategorijama, čime se postiže usporedivost između ispitanika i mjernih trenutaka unutar istog protokola. Riječ je o skali s 11 kategorija (raspon 0 – 10) s verbalnim kategorijama uz odabrane vrijednosti (Tablica 3.1.), koja je u sportskoj znanosti široko prihvaćena kao valjana i pouzdana mjera percipiranog opterećenja zbog jednostavnosti primjene i osjetljivosti na promjene intenziteta opterećenja. Po završetku protokola opterećenja ispitanici su na navedenoj skali procjenjivali subjektivni osjećaj napora, čime je osigurana subjektivna dimenzija procjene razine umora kao nužan komplement objektivnim fiziološkim mjerama prikupljenim u istom mjernom trenutku.

Tablica 3.1. Borgova CR-10 skala subjektivnog osjećaja napora (Borg, 1982; prema Williams, 2017).

Rezultat	Nivo iscrpljenosti
0	nema iscrpljenosti
0,5	jako jako neznatna razina (tek primjetna razina umora)
1	jako neznatna razina
2	neznatna razina
3	srednja razina
4	donekle teška razina
5	teška razina
6	*
7	jako teška razina
8	*
9	submaksimalna razina
10	maksimalna razina



Slika 3.21. Prikaz testiranja kinematičkih varijabli

Tablica 3.2. Sumarni pregled fizioloških i kinematičkih varijabli

Varijabla (naziv i kratica)	Mjerna jedinica	Faza skok šuta	Mjerni instrument	Validacijska istraživanja (autori i godina)
FIZIOLOŠKE VARIJABLE				
frekvencija srca (FS)	bpm	–	<i>Polar H10</i>	Schaffarczy i sur. (2022)
koncentracija laktata (Lak)	mmol/L	–	<i>Lactate Scout 3</i>	Crotty i sur. (2021); Sporiš i sur. (2014)
subjektivni osjećaj umora (SOU)	0–10	–	Borgova skala	Williams (2017); Stamford (1976)
KINEMATIČKE VARIJABLE				
Faza zaleta				
maksimalna brzina zdjelice (Pelvis_Vmax)	m/s	zalet	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
Faza odraza				
maksimalna kutna brzina skočnog zgloba odrazne noge (Gležanj_AVmax)	°/s	odraz	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna kutna brzina koljena odrazne noge (Koljeno_AVmax)	°/s	odraz	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna kutna brzina kuka odrazne noge (Kuk_AVmax)	°/s	odraz	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
trajanje kontakta s podlogom (Tkont)	ms	odraz	<i>Optojump Next</i>	Glatthorn i sur. (2011); Trofin i Honceriu (2017)
maksimalna brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax)	m/s	odraz	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna brzina potkoljenice odrazne noge (Potk_Vmax)	m/s	odraz	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
Faza leta i izbačaja				
maksimalna brzina ramena šuterske ruke (Rame_Vmax)	m/s	let i izbačaj	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna brzina nadlaktice šuterske ruke (Nadl_Vmax)	m/s	let i izbačaj	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna brzina podlaktice šuterske ruke (Podl_Vmax)	m/s	let i izbačaj	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna brzina šake šuterske ruke (Šaka_Vmax)	m/s	let i izbačaj	<i>Xsens MVN</i>	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)

maksimalna kutna brzina ramena šuterske ruke (Rame_AVmax)	°/s	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna kutna brzina lakta šuterske ruke (Lakat_AVmax)	°/s	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna kutna brzina ručnog zgloba šuterske ruke (Ručni_AVmax)	°/s	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna visina šake šuterske ruke (Šaka_VIS)	cm	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalna visina natkoljenice zamašne noge (Nat_VISmax)	cm	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalni kut u zglobu kuka zamašne noge (Kuk_Amax)	°	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge (Kolj_Amax)	°	let i izbačaj	Xsens MVN	Zhang i sur. (2013); Robert-Lachaine i sur. (2017)
visina skoka	cm	let i izbačaj	Xsens MVN / Optojump Next	Zhang i sur. (2013); Glatthorn i sur. (2011)
duljina skoka	cm	let i izbačaj	Xsens MVN / Optojump Next	Zhang i sur. (2013); Glatthorn i sur. (2011)
Završna faza				
maksimalna brzina lopte (Lopta_Vmax)	km/h	završna faza	Stalker ATS II radar	van den Tillaar (2013)
preciznost šuta (PREC)	cm	završna faza	Panasonic GH5 + Kinovea	Raeder i sur. (2015)

Tablica 3.2. prikazuje sumarni pregled svih varijabli korištenih u istraživanju, uključujući njihove mjerne jedinice, fazu skok šuta u kojoj su mjerene, mjerni instrument te istraživanja kojima je validiran pojedini instrument. Varijable su razvrstane u dvije kategorije – fiziološke i kinematičke – pri čemu su kinematičke varijable dodatno organizirane prema faznoj strukturi skok šuta.

3.4. Protokol mjerenja

Protokol mjerenja osmišljen je s ciljem standardizacije uvjeta testiranja i osiguravanja pouzdanosti podataka u svim fazama istraživanja. Mjerenja su provedena u kontroliranim uvjetima sportske dvorane, pri čemu su svi ispitanici

testirani pojedinačno, u istom dijelu dana, kako bi se smanjio utjecaj dnevnih varijacija na fiziološke parametre.

Svi ispitanici dva su dana prije testiranja imali smanjen intenzitet treninga i nisu sudjelovali u natjecanjima, kako bi se izbjegao kumulativni umor. Testiranje je provedeno nakon natjecateljske sezone, u fazi aktivnog oporavka, čime je osigurana ujednačena fiziološka osnova. Redoslijed izvođenja mjerenja bio je identičan za sve ispitanike, a svi su dobili jednake upute o zadatku, ciljanju i intenzitetu šuta. Svaki ispitanik bio je upoznat s ciljevima istraživanja i važnošću precizne izvedbe. Tijekom testiranja bili su prisutni treneri i istraživači koji su ispitanike usmeno poticali na maksimalnu izvedbu.

Protokol mjerenja:

- mjerenje koncentracije mliječne kiseline u krvi
- mjerenje osnovnih antropometrijskih mjera
- postavljanje kinematičkog sustava na tijelo ispitanika
- standardno zagrijavanje ispitanika od 15 minuta, probni šutovi na gol
- kalibracija sustava kinematičkog odijela
- mjerenje koncentracija mliječne kiseline u krvi
- 5 šutova na gol sa srednje vanjske pozicije (razmak između šutova iznosi 30 sekundi)
- provođenje progresivnog diskontinuiranog testa do otkaza 30-15 (IFT)
- mjerenje koncentracije mliječne kiseline u krvi
- subjektivna procjena umora ispitanika (Borgova skala)
- 5 šutova na gol sa srednje vanjske pozicije (razmak između šutova iznosi 30 sekundi)
- 1 minuta odmora od završetka testa do izvođenja prvog šuta nakon opterećenja.

Protokol mjerenja podijeljen je u tri glavne faze.

FAZA 1. Priprema i inicijalna mjerenja

U mirovanju su izmjerene frekvencija srca (FS_mir) i koncentracija laktata u krvi (Lak_mir) nakon jedne minute ležanja na strunjači. Nakon prikupljanja fizioloških pokazatelja provedena su antropometrijska mjerenja pomoću mjerne trake sustava *Xsens* i visinomjera (tjelesna visina, tjelesna masa, postotak masnog tkiva, raspon ruku, biakromijalni raspon, širina zdjelice, visina ramena, duljina noge, duljina stopala, širina koljena, širina gležnja), a dobiveni podaci korišteni su za kalibraciju sustava

Xsens. Nakon mjerenja ispitanik oblači odijelo sustava *Xsens*. Ispitanici su potom procjenjivali subjektivni osjećaj umora prema Borgovoj CR-10 skali (SOU), čime je zabilježena početna razina umora prije početka testiranja.

Krvni uzorak uziman je iz prstenjaka nedominantne ruke. Prije uzimanja uzorka koža na jagodici prsta temeljito se dezinficira antiseptičkim sredstvom kako bi se smanjio rizik od infekcije, a potom se obriše sterilnom gazom kako bi se uklonio višak antiseptika i osigurala čista površina za ubod. Lancetom se napravi ubod u prst, čime se omogućuje izlazak kapilarnog uzorka krvi. Prve dvije kapljice koje se pojave nakon uboda odbacuju se jer mogu sadržavati nečistoće s površine kože ili tkivnu tekućinu koja bi mogla utjecati na točnost mjerenja. Za analizu se koristi treća kap krvi, koja se nanosi na senzor laktatomjera *Lactate Scout (EKF Diagnostics, SensLab)*, posebno namijenjen brzom i pouzdanom mjerenju koncentracije laktata u krvi. Uređaj automatski očitava vrijednost koncentracije laktata, izraženu u milimolima po litri (mmol/L). Po završetku mjerenja mjesto uboda dezinficira se i zaštićuje flasterom.

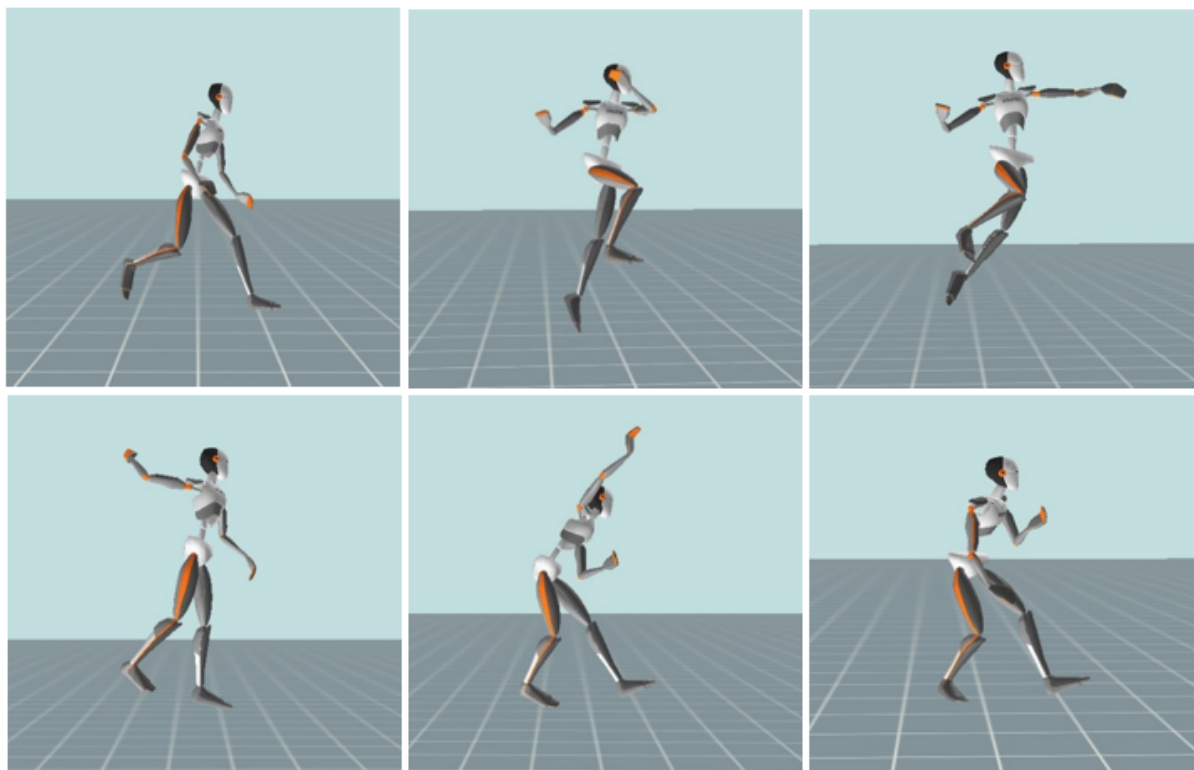
FAZA 2. Zagrijavanje i prvi niz šutova

Standardizirano zagrijavanje traje 15 minuta i uključuje trčanje s promjenama smjera, dinamičko razgibavanje, dodavanja u paru i 10 šutova na gol s progresivnim intenzitetom, nakon čega se provodi kalibracija sustava i drugo mjerenje koncentracije laktata u krvi.

Po završetku drugog mjerenja laktata ispitanici pristupaju prvom izvođenju skok šuta u uvjetu prije opterećenja. Svaki ispitanik izvodi prvi niz od pet šutova na gol, pri čemu se bilježe fiziološki parametri putem srčanog monitora, kinematički parametri putem sustava *Xsens*, trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom i duljina skoka putem sustava *Optojump*, brzina lopte pomoću radara *Stalker ATS II* te preciznost šuta kamerom s visokom frekvencijom snimanja (180 fps), što omogućuje preciznu analizu snimke u programskom alatu *Kinovea*.

Svaki ispitanik izvodio je skok šut na rukometni gol pravolinijskim zaletom s pozicije srednjeg vanjskog igrača, s odrazom na udaljenosti devet metara od gola. Zalet se provodio na način da je ispitanik najprije izveo tri koraka, zatim jedno vođenje lopte, potom rukometni trokorak i skok šut. Ciljana zona šuta standardizirana je prema dominantnosti ruke – dešnjaci su šutirali prema desnom gornjem kutu gola, a ljevac prema lijevom gornjem kutu gola. Između svakog pokušaja primijenjen je odmor od 30 sekundi kako bi se osigurao oporavak živčano-mišićnog sustava između uzastopnih

izvedbi i smanjila varijabilnost rezultata uzrokovana akutnim lokalnim umorom. Svi šutovi izvodili su se maksimalnim intenzitetom (Šibila, 2003; van den Tillaar i Ettema, 2004).



Slika 3.22. Prikaz kinematičke analize skok šuta sustavom *Xsens Awinda* (*Xsens Technologies B.V., Enschede, Nizozemska*)

Na Slici 3.21. prikazan je kinogram izvedbe skok šuta iz zaleta. Prikazane sličice izvezene su iz programskog paketa sustava *Xsens* te prikazuju sljedeće faze: zadnji korak zaleta i odraz, aktivaciju zamašne noge, fazu leta i zamaha gornjeg ekstremiteta, početak izbačaja lopte, završetak izbačaja lopte te doskok.

FAZA 3. Protokol opterećenja i drugi niz šutova

Protokol opterećenja proveden je prema *30-15 Intermittent Fitness Testu*, koji je u literaturi potvrđen kao valjano sredstvo za induciranje visokog i kontroliranog fiziološkog opterećenja u uvjetima intermitentnog napora karakterističnog za sportske igre (Buchheit, 2008). Test se temelji na strukturiranoj izmjeni intervala trčanja u trajanju od 30 sekundi i pasivnog odmora u trajanju od 15 sekundi, pri čemu se brzina kretanja progresivno povećava za 0,5 km/h nakon svakog uspješno završenog intervala, počevši od početne brzine od 8 km/h. Ritam kretanja unaprijed je određen standardiziranim zvučnim signalima koji označavaju trenutak promjene smjera na

mjernoj dionici, čime je osigurana precizna kontrola intenziteta opterećenja i usporedivost rezultata između ispitanika. Ispitanici su izvodili test trčanjem između dviju linija postavljenih na međusobnoj udaljenosti od 40 metara, pri čemu su na svakom kraju dionice bile određene zone tolerancije širine 3 metra koje su ispitanici bili obvezni pravodobno dosegnuti pri svakom zvučnom signalu. Kriterij prekida testa bio je objektivno određen kao tri uzastopna neuspjela pokušaja dosezanja zadane zone u predviđenom vremenskom intervalu, čime je isključen subjektivni utjecaj ispitivača na određivanje granice iscrpljenosti. Posljednja uspješno izvedena brzina trčanja definira se kao maksimalna intermitentna brzina trčanja (VIFT) i predstavlja primarni izlazni parametar testa kojim se kvantificira aerobno-anaerobni kapacitet ispitanika. Navedeni protokol odabran je zbog visoke valjanosti u kontekstu intermitentnih sportova, zato što izmjenična struktura opterećenja i odmora vjerno odražava metaboličke i živčano-mišićne zahtjeve rukometne utakmice, istovremeno osiguravajući ponovljivo i standardizirano induciranje visokog fiziološkog opterećenja potrebnog za ispitivanje utjecaja umora na kinematičke parametre skok šuta. Neposredno nakon testa ponovno su izmjerene koncentracija laktata i frekvencija srca, a ispitanici su drugi put procijenili subjektivnu razinu umora prema Borgovoj CR-10 skali (SOU).

Ispitanici su zatim izveli drugi niz od pet šutova pod istim uvjetima kao u prvoj fazi, čime je omogućena usporedba kinematičkih i izvedbenih parametara prije i nakon opterećenja.

Tablica 3.3. Prikaz protokola mjerenja po fazama

FAZA	POSTUPCI
FAZA 1. Priprema i inicijalna mjerenja	
fiziološka mjerenja u mirovanju	mjerenje FS i Lak nakon 1 minute ležanja na strunjači
antropometrijska mjerenja	TV, TM, % mast, rasponR, raspon:biak, zdjelica_š, rame_v, noga, stopalo, koljeno, skočni zglob — za kalibraciju <i>Xsens</i> sustava
oblačenje <i>Xsens</i> odijela	postavljanje 17 senzora na segmente tijela i kalibracija sustava
uzimanje uzorka krvi	kapilarni uzorak iz prstenjaka nedominantne ruke; analiza laktata uređajem <i>Lactate Scout 3</i> (mmol/L)

FAZA 2: Zagrijavanje i prvi niz šutova	
standardizirano zagrijavanje (15 min)	trčanje s promjenama smjera, dinamičko razgibavanje, dodavanja u paru, 10 šutova na gol s progresivnim intenzitetom
drugo mjerenje laktata	mjerenje koncentracije laktata (Lak) neposredno prije prvog niza šutova
prvi niz šutova (5 šutova)	skok šut s pozicije srednjeg vanjskog, zalet 3 koraka + vođenje + trokorak, odraz s 9 m; bilježe se: kinematički parametri (<i>Xsens</i>), Tkont i visina skoka (<i>Optojump</i>), brzina lopte (<i>Stalker ATS II radar</i>), preciznost (<i>Panasonic GH5</i> , 180 fps / <i>Kinovea</i>)
uvjeti izvedbe	maksimalna brzina šuta; ciljana zona: gornji kut gola; odmor između šutova: 30 sekundi
FAZA 3: Protokol opterećenja i drugi niz šutova	
protokol iscrpljivanja	provođenje progresivnog diskontinuiranog testa do otkaza 30-15 (Buchheit, 2008): izmjena 30 s trčanja i 15 s odmora, progresivno povećanje brzine za 0.5 km/h; start 8 km/h; dionica 40 m; prekid: 3 uzastopna neuspjela pokušaja dosezanja zone
fiziološka mjerenja nakon iscrpljivanja	mjerenje FS i Lak neposredno nakon testa; usmeno izjašnjavanje prema Borgovoj skali (SOU)
drugi niz šutova (5 šutova)	isti uvjeti izvedbe kao u 2. fazi, bilježe se isti kinematički, fiziološki i izvedbeni parametri

Opisani protokol omogućio je preciznu kvantifikaciju promjena izazvanih umorom uz visoku razinu kontroliranosti i ponovljivosti mjerenja. Valjanost primijenjenih instrumenata i metodološka dosljednost primijenjena u svim fazama istraživanja osigurali su znanstvenu utemeljenost dobivenih rezultata.

Tablica 3.4. Shematski prikaz protokola mjerenja po fazama

FAZA 1 Priprema i inicijalna mjerenja	FAZA 2 Zagrijavanje i prvi niz šutova	FAZA 3 Ischrpljivanje i drugi niz šutova
FS i Lak1 u mirovanju	zagrijavanje (15 min)	30–15 test (Buchheit, 2008)
antropometrijska mjerenja	mjerenje Lak2	Mjerenje Lak3 + FS + SOU
oblačenje <i>Xsens</i> odijela	1. niz – 5 skok šutova	2. niz – 5 skok šutova
uzimanje uzorka krvi		

Tablica 3.4. prikazuje shematski prikaz protokola mjerenja strukturiranog u tri uzastopne faze. U prvoj fazi provedena su inicijalna fiziološka i antropometrijska

mjerenja te kalibracija kinematičkog sustava. Druga faza obuhvaća standardizirano zagrijavanje i prvi niz skok šutova, pri čemu su istovremeno bilježeni kinematički, fiziološki i izvedbeni parametri. U trećoj fazi proveden je protokol opterećenja prema 30-15 *Intermittent Fitness Testu* (Buchheit, 2008), nakon kojeg su ponovljena fiziološka mjerenja i izveden drugi niz skok šutova pod jednakim uvjetima, čime je omogućena usporedba parametara prije i nakon induciranog umora.

3.5. Metode obrade podataka

Obrada podataka provedena je u statističkim programima *Statistica* (v. 13.05.0.17, *StatSoft Inc.*) i R (v. 4.2.2), koji omogućuju naprednu obradu podataka, vizualizaciju rezultata i reproducibilnost analize. Za procjenu potrebne veličine uzorka primijenjen je program *G*Power* (v. 3.1.9.2). Pri pretpostavljenoj veličini učinka srednje razine (*Cohen's d* = 0,50), razini statističke značajnosti $\alpha = 0,05$ i statističkoj snazi $1 - \beta = 0,80$, analiza je potvrdila da tri valjana pokušaja skok šuta po mjernoj točki na uzorku od 20 ispitanika osiguravaju dostatnu osjetljivost nacрта za pouzdanu detekciju očekivanih promjena u kinematičkim parametrima skok šuta pod utjecajem fiziološkog opterećenja.

Za sve analizirane varijable izračunati su osnovni deskriptivni pokazatelji: aritmetička sredina (AS), standardna devijacija (SD), minimalne i maksimalne vrijednosti. Navedeni pokazatelji omogućili su uvid u raspon, centralne tendencije i varijabilnost podataka te su poslužili kao osnova za daljnje inferencijalne analize.

Prije primjene parametrijskih postupaka provjerena je normalnost distribucije podataka primjenom *Shapiro–Wilk testa*, koji je prikladan za manje uzorke. Većina varijabli pokazala je prihvatljiva odstupanja od normalnosti, što je omogućilo primjenu parametrijskih testova. Homogenost varijanci provjerena je *Leveneovim testom*, čime su zadovoljene pretpostavke za provođenje analiza varijance.

Za ispitivanje globalnih učinaka fiziološkog opterećenja na skup međusobno povezanih kinematičkih i izvedbenih parametara primijenjena je multivarijantna analiza varijance za ponovljena mjerenja (MANOVA), pri čemu je *Wilksova lambda* korištena kao kriterij za procjenu ukupnih razlika između mjerenja (Tabachnick i Fidell, 2013). Za identifikaciju statistički značajnih razlika na razini pojedinih varijabli, za 18 kinematičkih varijabli provedena je analiza varijance za ponovljena mjerenja (ANOVA), a za četiri izvedbene varijable (trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom, duljina skoka,

brzina lopte i preciznost šuta) primijenjen je t-test za zavisne uzorke. Statistička značajnost definirana je na razini $p < 0,05$.

Uz statističku značajnost, za svaku statistički značajnu varijablu izračunata je i veličina učinka: za varijable analizirane ANOVA-om izražena je parcijalnim eta-kvadratom (η^2), a za varijable analizirane t-testom *Cohenovim* d koeficijentom. Referentne vrijednosti za interpretaciju veličine učinka preuzete su prema *Cohenu* (1988): $\eta^2 \geq 0,01$ mala, $\eta^2 \geq 0,06$ srednja i $\eta^2 \geq 0,14$ velika veličina učinka; $d \geq 0,2$ mala, $d \geq 0,5$ srednja i $d \geq 0,8$ velika veličina učinka.

Radi utvrđivanja je li viša razina metaboličkog opterećenja izravno povezana s većim padom kinematičkih parametara, provedena je *Pearsonova* korelacijska analiza između vršne koncentracije laktata (30-15_Lak) pojedinih ispitanika i postotne promjene svake od 11 promatranih kinematičkih i izvedbenih varijabli između uvjeta prije i nakon opterećenja.

Uz standardne statističke postupke, provedena je i analiza individualnih obrazaca promjene za svaku statistički značajnu varijablu – broj ispitanika koji bilježe pad te broj ispitanika koji bilježe porast vrijednosti, uz srednje i maksimalne postotne promjene unutar svake od tih skupina – čime je osiguran uvid u konzistentnost učinka opterećenja na razini pojedinih ispitanika. Također je provedena analiza koja obuhvaća deskriptivni prikaz postotnih promjena statistički značajnih varijabli razvrstanih prema igračkim pozicijama ispitanika (vanjski igrači, krilni igrači i kružni napadači), s ciljem utvrđivanja pozicijsko-specifičnih obrazaca kinematičke prilagodbe na fiziološko opterećenje. Navedena pozicijska analiza deskriptivne je naravi – razlike između pozicija nisu statistički testirane zbog malog uzorka po skupinama.

Za procjenu proksimalno-distalnog redoslijeda aktivacije segmenata kinetičkog lanca izračunati su vremenski razmaci između postizanja maksimalnih linearnih brzina susjednih segmenata – natkoljenice, ramena, nadlaktice, podlaktice i šake – zasebno u uvjetima prije i nakon opterećenja. Vrijednosti izvan raspona ± 500 ms od skupne srednje vrijednosti tretirane su kao mjerni artefakti i isključene iz analize radi osiguravanja pouzdanosti vremenskih procjena. Pozitivne vrijednosti vremenskih razmaka potvrđuju ispravan proksimalno-distalni slijed aktivacije.

3.6. Etika i kontrola varijabli

Istraživanje je provedeno u skladu s Helsinškom deklaracijom, uz prethodno odobrenje etičkog povjerenstva Kineziološkog povjerenstva Sveučilišta u Zagrebu, (broj odobrenja: 16/2021, 19.5.2021.). Kontrola varijabli osigurana je standardizacijom protokola mjerenja, uključujući vrijeme testiranja, uvjete zagrijavanja i pauze između šutova, a svi igrači su potpisali pristanak za sudjelovanje u istraživanju te korištenje osobnih podataka. Ispitanici su bili bez ozljeda, u istom dijelu natjecateljske sezone, čime je smanjen utjecaj vanjskih faktora na rezultate.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Tablica 4.1. Uzorak ispitanika – morfološke karakteristike (N = 20)

Varijabla	AS	Min	Maks	SD
masa	88,9	71,4	106,2	8,9
postotak masti	13,1	6,6	20,9	3,4
BMI	24,4	13,8	30	3,6

*N = broj ispitanika, AS – aritmetička sredina rezultata, Min – minimalna vrijednost, Maks – maksimalna vrijednost, SD – standardna devijacija

Morfološke karakteristike ispitanika prikazuju da je uzorak u prosjeku imao tjelesnu masu $88,92 \text{ kg} \pm 8,86 \text{ kg}$, s rasponom vrijednosti od 71,4 do 106,2 kg. Prosječni postotak masnog tkiva iznosio je $13,1 \% \pm 3,4 \%$, s rasponom od 6,6 % do 20,9 % (Tablica 4.1.). Prosječne vrijednosti indeksa tjelesne mase (BMI) iznose $24,4 \text{ kg/m}^2 \pm 3,6 \text{ kg/m}^2$, s rasponom vrijednosti od 13,8 kg/m^2 do 30 kg/m^2 .

Tablica 4.2. Uzorak ispitanika – morfološke karakteristike po igračkim pozicijama

Varijabla	Vanjski napadači (n=13)	Krilni napadači (n=4)	Kružni napadači (n=3)
tjelesna masa	88,9	80,9	99,4
Min (TM)	81,3	71,4	90,2
Max (TM)	104,4	94,2	106,2
postotak masti	12,4	13	15,9
Min (% masti)	6,6	12	12,2
Max (% masti)	17,2	15,4	15,4
BMI	24,8	20,2	27,2
Min (BMI)	20,2	12,8	23,7
Max (BMI)	27,2	24,3	30,0

*TM – tjelesna masa (kg); % masti – udio masnog tkiva u ukupnoj tjelesnoj masi (%); BMI – indeks tjelesne mase (kg/m^2); Min – minimalna zabilježena vrijednost unutar pojedine igračke pozicije; Max – maksimalna zabilježena vrijednost unutar pojedine igračke pozicije; n – broj ispitanika.

Tablica 4.2. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje morfoloških karakteristika ispitanika razvrstanih prema igračkim pozicijama. Vanjski igrači imali su prosječnu tjelesnu masu 88,9 kg (raspon 81,3 – 104,4 kg), prosječni postotak masnog tkiva 12,4 % (raspon 6,6 – 17,2 %) te prosječni BMI 24,8 kg/m² (raspon 20,2 – 27,2 kg/m²). Krilni igrači imali su prosječnu tjelesnu masu 80,9 kg (raspon 71,4 – 94,2 kg), prosječni postotak masnog tkiva 13 % (raspon 12 – 15,4 %) te prosječni BMI 20,6 kg/m² (raspon 13,8 – 24,3 kg/m²). Kružni napadači imali su prosječnu tjelesnu masu 99,4 kg (raspon 90,2 – 106,2 kg), prosječni postotak masnog tkiva 15,9 % (raspon 12,2 – 20,9 %) te prosječni BMI 27,7 kg/m² (raspon 23,7 – 30 kg/m²).

Tablica 4.3. Uzorak ispitanika – antropometrijske karakteristike (N = 20).

Varijabla	AS	Min	Maks	SD
visina	188	179	197,5	5,7
duljina stopala	29,2	26,5	31	1,1
duljina tenisice	32,6	29	35	1,5
visina gležnja	11,4	10	13	0,8
visina koljena	56,2	51	62,5	3,1
visina kuka	100,2	95	108	3,2
širina kukova	33,6	29	37	2,2
visina ramena	157,5	150	165	4,6
širina ramena	47,2	45	51	1,8
raspon ruku	190,9	179	207	7,2

*N = broj ispitanika, AS – aritmetička sredina rezultata, Min – minimalna vrijednost, Maks – maksimalna vrijednost, SD – standardna devijacija

Tablica 4.3. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje antropometrijskih varijabli izmjerenih na uzorku od 20 ispitanika. Prosječna tjelesna visina iznosila je 188 ± 5,7 cm (raspon 179 – 197,5 cm). Prosječna duljina stopala iznosila je 29,2 ± 1,1 cm (raspon 26,5 – 31 cm), a prosječna duljina tenisice 32,6 ± 1,5 cm (raspon 29 – 35 cm). Prosječna visina gležnja iznosila je 11,4 ± 0,8 cm (raspon 10 – 13 cm), a prosječna visina koljena 56,2 ± 3,1 cm (raspon 51 – 62,5 cm). Prosječna visina kuka iznosila je 100,2 ± 3,2 cm (raspon 95 – 108 cm), a prosječna širina kukova 33,6 ± 2,2 cm (raspon 29 – 37 cm). Prosječna visina ramena iznosila je 157,5 ± 4,6 cm (raspon 150 – 165

cm), a prosječna širina ramena $47,2 \pm 1,8$ cm (raspon 45 – 51 cm). Prosječni raspon ruku iznosio je $190,9 \pm 7,2$ cm (raspon 179 – 207 cm).

Tablica 4.4. Fiziološki parametri mjereni prije, tijekom i nakon protokola opterećenja (N = 20)

Varijabla	AS	Minimum	Maksimum	SD
FS_mir	85	68	94	6,6
1. prije_FS_max	162	138	188	14,4
30-15_FS_max	195	180	205	7,3
2. poslije_FSmax	176	158	199	9,7
Lak_mir	1,2	0,6	2,2	0,4
1.prije_Lak	1,9	0,9	3,7	0,7
30-15_Lak	12,2	7,2	18,4	3,1
30-15_brzina	18,2	16,5	20	1,1
30-15_SOU	8,3	7	10	1,0

*FS_mir – frekvencija srca u mirovanju, 1. prije_FS_max – prosječna maksimalna frekvencija srca tijekom prvog niza šutova prije protokola opterećenja, 30-15_FS_max – maksimalna frekvencija srca tijekom protokola opterećenja, 2. poslije_FS_max – prosječna maksimalna frekvencija srca u drugom nizu šutova, Lak_mir – koncentracija laktata u mirovanju, 1. prije_Lak – koncentracija laktata tijekom prvog niza šutiranja prije protokola opterećenja, 30-15_Lak – koncentracija laktata nakon protokola opterećenja, 30-15_brzina – maksimalna brzina trčanja postignuta u protokolu opterećenja, 30-15_SOU – subjektivan osjećaj opterećenja mjeran Borgovom skalom, N – veličina uzorka; AS – aritmetička sredina rezultata, Minimum – minimalna vrijednost; Maksimum – maksimalna vrijednost; SD – standardna devijacija

Tablica 4.4. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje fizioloških varijabli na uzorku od 20 ispitanika. Prosječna frekvencija srca u mirovanju (FS_mir) iznosila je 85 ± 7 o/min (raspon 68 – 94 o/min), a prosječna koncentracija laktata u mirovanju (Lak_mir) $1,2 \pm 0,4$ mmol/L (raspon 0,6 – 2,2 mmol/L). Tijekom izvođenja prvog niza šutova prije protokola opterećenja prosječna maksimalna frekvencija srca (1.prije_FS_max) iznosila je 162 ± 14 o/min (raspon 138 – 188 o/min), a prosječna koncentracija laktata (1. prije_Lak) $1,9 \pm 0,7$ mmol/L (raspon 0,9 – 3,7 mmol/L). Tijekom primjene 30-15 Intermittent Fitness Testa prosječna maksimalna frekvencija srca (30-15_FS_max) iznosila je 195 ± 7 o/min (raspon 180 – 205 o/min), a prosječna maksimalna brzina trčanja (30-15_brzina) $18,2 \pm 1,1$ km/h (raspon 16,5 – 20,0 km/h). Subjektivni osjećaj umora procijenjen Borgovom CR-10 skalom (30-15_SOU) u prosjeku je iznosio $8,3 \pm 1$ (raspon 7 – 10). Prosječna koncentracija laktata izmjerena

neposredno nakon završetka protokola opterećenja (30-15_Lak) iznosila je $12,2 \pm 3,1$ mmol/L (raspon 7,2 – 18,4 mmol/L). Prosječna maksimalna frekvencija srca tijekom izvođenja drugog niza šutova nakon protokola opterećenja (2.poslije_FS_max) iznosila je 176 ± 10 o/min (raspon 158 – 199 o/min).

Tablica 4.5. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi zaleta

Faza šuta	Naziv varijable	AS	Minimum	Maksimum	SD
Zalet (N=200)	Pelvis_V _{max}	5,6	4,6	6,9	0,50

Tablica 4.5. prikazuje sumarne deskriptivne pokazatelje kinematičke varijable izmjerene u fazi zaleta za ukupno 200 izvedenih skok šutova (N = 200). Prosječna vršna linearna brzina zdjelice (Pelvis_V_{max}) iznosila je $5,6 \pm 0,5$ m/s (raspon 4,6 – 6,9 m/s). Relativno niska standardna devijacija ove varijable upućuje na visoku homogenost uzorka u pogledu brzine zaleta, što ukazuje na ujednačenu tehniku pristupa odraznom trenutku među ispitanicima. Vršna linearna brzina zdjelice u fazi zaleta predstavlja inicijalnu kinetičku energiju proksimalnog segmenta tijela koja se u nastavku gibanja prenosi prema distalnim segmentima kinetičkog lanca šuterskog pokreta.

Tablica 4.6. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi odraza

Faza šuta	Naziv varijable	AS	Minimum	Maksimum	SD
odraz (N=200)	Gležanj_AV _{max}	600,6	121,5	1068,4	189,1
	Kolj_AV _{max}	546,3	308,3	864,8	93,9
	Kuk_AV _{max}	518,4	226,3	1087,7	170,4
	Tkont	202,1	151,0	245,0	20,0
	Natk_V _{max}	4,9	3,3	6,9	0,7
	Potk_V _{max}	6,7	3,7	9,8	1,2

Tablica 4.6. prikazuje sumarne deskriptivne pokazatelje kinematičkih varijabli izmjerenih u fazi odraza za ukupno 200 izvedenih skok šutova (N = 200). Prosječna vršna kutna brzina skočnog zgloba odrazne noge (Gležanj_AV_{max}) iznosila je $600,6 \pm 189,1$ °/s (raspon 121,5 – 1068,4 °/s), a prosječna vršna kutna brzina koljena odrazne (Kolj_AV_{max}) $546,3 \pm 93,9$ °/s (raspon 308,3 – 864,8 °/s). Prosječna vršna kutna brzina

kuka odrazne noge (Kuk_AVmax) iznosila je $518,4 \pm 170,4$ °/s (raspon 226,3 – 1087,7 °/s), a prosječno vrijeme kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) $202,1 \pm 20,0$ ms (raspon 151,0 – 245,0 ms). Prosječna vršna linearna brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax) iznosila je $4,9 \pm 0,7$ m/s (raspon 3,3 – 6,9 m/s), a prosječna vršna linearna brzina potkoljenice odrazne noge (Potk_Vmax) $6,7 \pm 1,2$ m/s (raspon 3,7 – 9,8 m/s).

Tablica 4.7. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi leta i izbačaja lopte

Faza šuta	Naziv varijable	AS	Minimum	Maksimum	SD
let i izbačaj lopte (N=200)	Rame_AV _{max}	1267,1	324,0	2507,6	422,6
	Lakat_AV _{max}	1127,2	435,0	2092,6	321,6
	Ručni_AV _{max}	693,5	174,0	1484,9	262,0
	Rame_V _{max}	4,8	3,1	6,7	0,7
	Nadl_V _{max}	6,3	5,0	8,0	0,6
	Podl_V _{max}	11,4	9,3	14,2	1,0
	Šaka_V _{max}	12,4	10,1	16,1	1,0
	Kolj_A _{max}	121,7	85,8	142,7	9,8
	Kuk_A _{max}	64,5	25,8	89,1	12,8
	Natk_VIS _{max}	158,0	140,5	179,6	8,4
	Šaka_VIS	249,6	216,4	278,8	12,1
	Visina skoka	51,9	35,3	69,3	6,8
	Duljina odraza	238,3	174,0	327,0	32,4

Tablica 4.7. prikazuje sumarne deskriptivne pokazatelje kinematičkih varijabli izmjerenih u fazi leta i izbačaja za ukupno 200 izvedenih skok šutova (N = 200). Navedene varijable obuhvaćaju vršne linearne brzine segmenata gornjeg ekstremiteta, maksimalne kutne brzine zglobova, maksimalne kuteve u zglobovima koljena i kuka zamašne noge, visinu natkoljenice zamašne noge i šake šuterske ruke te prostorne pokazatelje skoka.

Prosječna vršna linearna brzina ramena šuterske (Rame_Vmax) iznosila je $4,8 \pm 0,7$ m/s (raspon 3,1 – 6,7 m/s), nadlaktice šuterske ruke (Nadl_Vmax) $6,3 \pm 0,6$ m/s (raspon 5,0 – 8,0 m/s), podlaktice šuterske ruke (Podl_Vmax) $11,4 \pm 1,0$ m/s (raspon

9,3 – 14,2 m/s) te šake šuterske ruke (Šaka_Vmax) $12,4 \pm 1,1$ m/s (raspon 10,1 – 16,1 m/s). Navedene vrijednosti potvrđuju proksimalno-distalni slijed prijenosa brzine duž gornjeg ekstremiteta, pri čemu svaki distalniji segment postiže višu vršnu linearnu brzinu od proksimalnijeg.

Prosječna vršna kutna brzina ramenog zgloba šuterske ruke (Rame_AVmax) iznosila je $1267,1 \pm 422,6$ °/s (raspon 324,0 – 2507,6 °/s), lakta šuterske ruke (Lakat_AVmax) $1127,2 \pm 321,6$ °/s (raspon 435,0 – 2092,6 °/s) te ručnog zgloba šuterske ruke (Ručni_AVmax) $693,5 \pm 262,0$ °/s (raspon 174,0 – 1484,9 °/s). Visoke standardne devijacije kutnih brzina zglobova gornjeg ekstremiteta šuterske ruke upućuju na izraženu interindividualnu varijabilnost u tehnici izbačaja lopte među ispitanicima. Prosječni maksimalni kut koljena zamašne noge (Kolj_Amax) iznosio je $121,7 \pm 9,8^\circ$ (raspon $85,8 - 142,7^\circ$), a prosječni maksimalni kut kuka zamašne noge (Kuk_Amax) $64,5^\circ \pm 12,8^\circ$ (raspon $25,8^\circ - 89,1^\circ$). Prosječna maksimalna visina natkoljenice zamašne noge (Natk_VISmax) iznosila je $158,0 \pm 8,4$ cm (raspon 140,5–179,6 cm), a prosječna visina šake šuterske ruke u trenutku izbačaja (Šaka_VIS) $249,6 \pm 12,1$ cm (raspon 216,4 – 278,8 cm).

Prosječna duljina skoka iznosila je $238,3 \pm 32,4$ cm (raspon 174,0 – 327,0 cm), a prosječna visina skoka $51,9 \pm 6,8$ cm (raspon 35,3 – 69,3 cm).

Tablica 4.8. Sumarni deskriptivni pokazatelji svih izmjerenih šutova u završnoj fazi (N = 200)

Faza šuta	Naziv varijable	AS	Minimum	Maksimum	SD
završna	Lopta_V _{max}	88,1	68,6	110,7	7,1
	PREC	37,6	-7,1	138,9	29,6

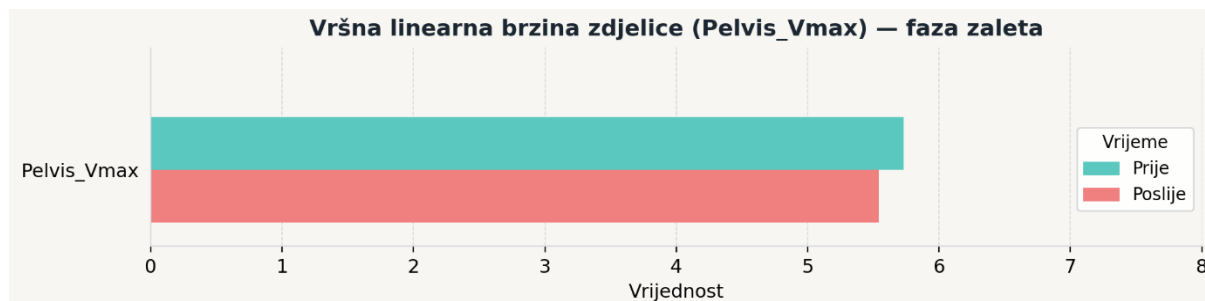
Tablica 4.8. prikazuje sumarne deskriptivne pokazatelje varijabli izmjerenih u završnoj fazi skok šuta za ukupno 200 izvedenih šutova (N = 200). Navedene varijable obuhvaćaju vršnu brzinu lopte nakon izbačaja te preciznost šuta. Prosječna vršna brzina lopte (Lopta_Vmax) iznosila je $88,1 \pm 7,1$ km/h (raspon 68,6 – 110,7 km/h). Relativno niska standardna devijacija u odnosu na raspon vrijednosti upućuje na ujednačenu razinu brzine šuta među ispitanicima. Prosječna preciznost šuta (PREC) iznosila je $37,6 \pm 29,6$ cm (raspon -7,1 – 138,9 cm). Visoka standardna devijacija ove varijable upućuje na izraženu interindividualnu varijabilnost u preciznosti šuta među ispitanicima. Negativne vrijednosti varijable preciznosti (PREC) odražavaju smjer odstupanja lopte od ciljane zone, pri čemu vrijednosti ispod nule označavaju šutove

koji su prošli s suprotne strane referentne točke mjerenja, dok maksimalna vrijednost od 138,86 cm predstavlja najveće zabilježeno odstupanje od ciljane točke unutar uzorka.

Tablica 4.9. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u fazi zaleta (N=100)

Varijabla	Protokol	AS	Minimum	Maksimum	St. dev.
Pelvis_V _{max}	prije	5,7	4,8	6,9	0,49
	poslije	5,5	4,6	6,7	0,50

Tablica 4.9. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje kinematičke varijable izmjerene u fazi zaleta, s usporedbom vrijednosti dobivenih prije i nakon protokola opterećenja, na uzorku od 100 šutova u svakom uvjetu mjerenja. Prosječna vršna linearna brzina zdjelice (Pelvis_V_{max}) prije opterećenja iznosila je $5,7 \pm 0,49$ m/s (raspon 4,8 – 6,9 m/s), a nakon opterećenja $5,5 \pm 0,50$ m/s (raspon 4,6 – 6,7 m/s). Standardna devijacija ove varijable ostaje gotovo identična u oba uvjeta mjerenja, što upućuje na ujednačenu homogenost distribucije rezultata unatoč blagom padu prosječne vrijednosti nakon opterećenja.



Slika 4.1. Vršna linearna brzina zdjelice (Pelvis_V_{max}) u fazi zaleta prije i poslije opterećenja

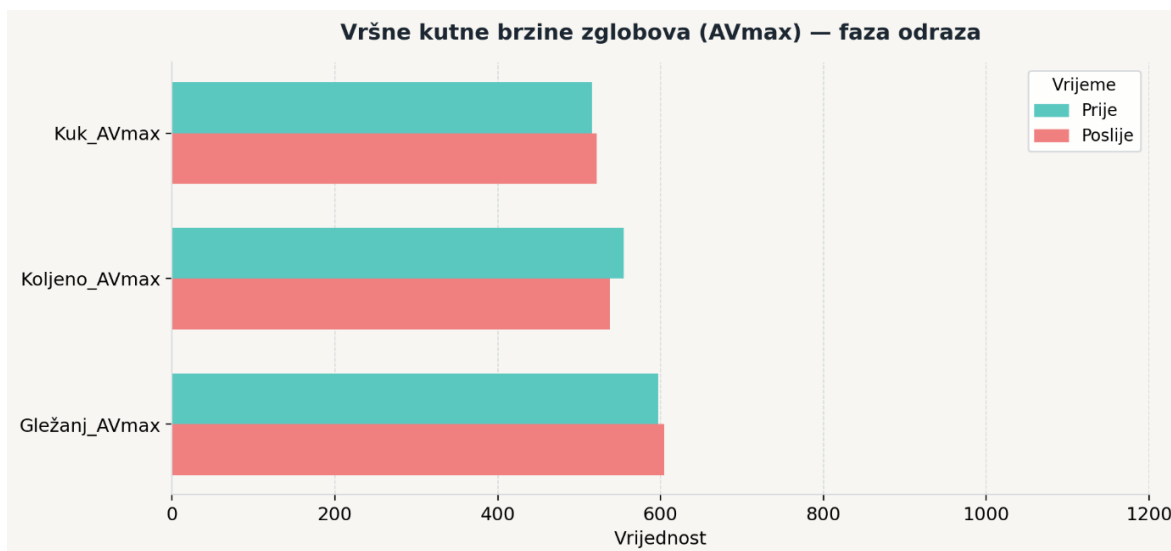
Tablica 4.10. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u fazi odraza (N=100)

Varijabla	Protokol	AS	Minimum	Maksimum	St. dev.
Gležanj_AV _{max}	prije	597,1	121,5	1068,4	198,4
	poslije	604,1	320,5	1010,7	180,2
Koljeno_AV _{max}	prije	554,8	328,4	864,8	101,7
	poslije	537,8	308,3	777,3	85,1
Kuk_AV _{max}	prije	515,5	226,3	1087,7	166,8

	poslije	521,4	254,0	1034,9	174,6
Tkont	prije	200,4	151,0	239,0	19,4
	poslije	203,8	154,0	245,0	20,6
Natk_V _{max}	prije	5,0	3,6	6,9	0,7
	poslije	4,7	3,3	6,4	0,6
Potk_V _{max}	prije	6,6	3,7	9,8	1,2
	poslije	6,8	4,8	9,8	1,1

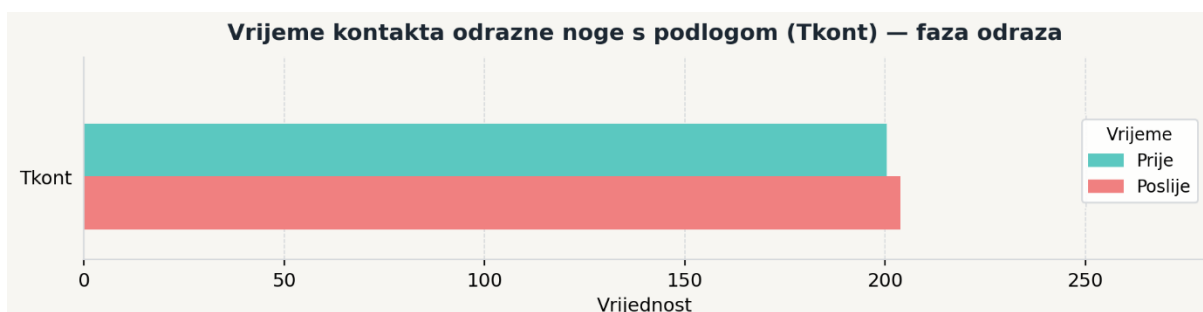
Tablica 4.10. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje kinematičkih varijabli izmjerenih u fazi odraza, s usporedbom vrijednosti dobivenih prije i nakon protokola opterećenja. Navedene varijable obuhvaćaju vršne kutne brzine zglobova donjih ekstremiteta, vrijeme kontakta odraznog stopala s podlogom te vršne linearne brzine segmenata natkoljenice i potkoljenice.

Prosječne vrijednosti vršne kutne brzine skočnog zgloba odrazne noge (Gležanj_AVmax) prije protokola iscrpljivanja iznose $597,1 \pm 198,4$ °/s, s rasponom vrijednosti od 121,5 do 1068,4 °/s. Nakon protokola iscrpljivanja prosječne vrijednosti iste varijable iznose $604,1 \pm 180,2$ °/s, s rasponom vrijednosti od 320,5 do 1010,7 °/s. Prosječne vrijednosti vršne kutne brzine koljena odrazne noge (Koljeno_AVmax) prije protokola iscrpljivanja iznose $554,8 \pm 101,7$ °/s, s rasponom vrijednosti od 328,4 do 864,8 °/s. Nakon protokola iscrpljivanja prosječne vrijednosti iste varijable iznose $537,8 \pm 85,1$ °/s, s rasponom vrijednosti od 308,3 do 777,3 °/s. Prosječne vrijednosti vršne kutne brzine kuka odrazne noge (Kuk_AVmax) prije protokola iscrpljivanja iznose $515,5 \pm 166,8$ °/s, s rasponom vrijednosti od 226,3 do 1087,7 °/s. Nakon protokola iscrpljivanja prosječne vrijednosti iste varijable iznose $521,4 \pm 174,6$ °/s, s rasponom vrijednosti od 254,0 do 1034,9 °/s.



Slika 4.2. Vršne kutne brzine zglobova donjih ekstremiteta zamašne noge (kuk, koljeno) i odrazne noge (gležanj) (AVmax) u fazi odraza prije i poslije opterećenja

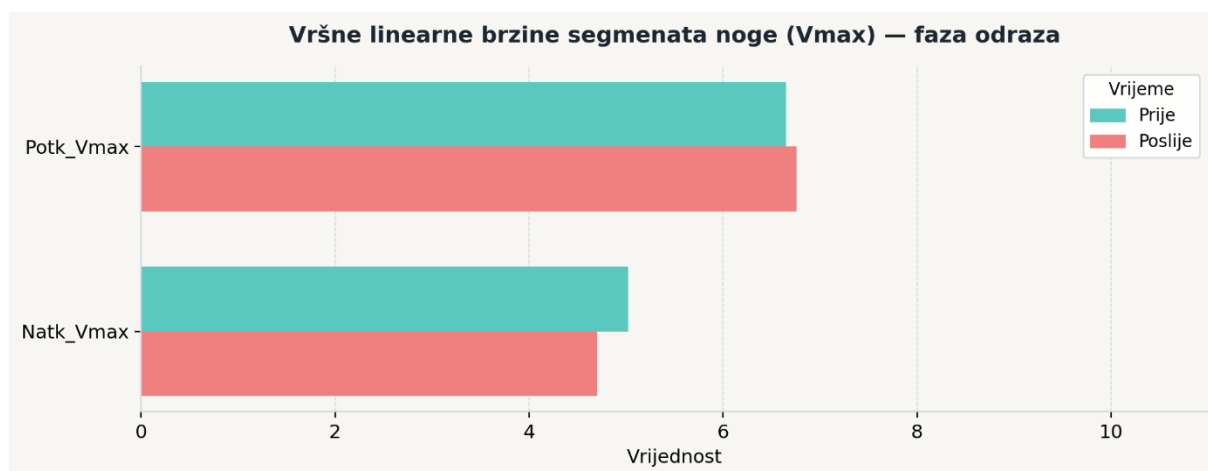
Prosječno vrijeme kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) prije opterećenja iznosilo je $200,4 \pm 19,4$ ms (raspon 151,0 – 239,0 ms), a nakon opterećenja $203,8 \pm 20,6$ ms (raspon 154,0 – 245,0 ms). Standardna devijacija ove varijable ostaje relativno ujednačena u oba uvjeta mjerenja, što upućuje na sličnu razinu homogenosti distribucije rezultata prije i nakon opterećenja.



Slika 4.3. Vrijeme kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) u fazi odraza prije i poslije opterećenja

Prosječna vršna linearna brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax) prije opterećenja iznosila je $5,0 \pm 0,7$ m/s (raspon 3,6 – 6,9 m/s), a nakon opterećenja $4,7 \pm 0,6$ m/s (raspon 3,3 – 6,4 m/s). Prosječna vršna linearna brzina potkoljenice odrazne noge (Potk_Vmax) prije opterećenja iznosila je $6,7 \pm 1,2$ m/s (raspon 3,7 – 9,8 m/s), a nakon opterećenja $6,7 \pm 1,1$ m/s (raspon 4,8 – 9,8 m/s). U skladu s proksimalno-distalnim slijedom prijenosa brzine, vršne linearne brzine potkoljenice u oba uvjeta mjerenja premašuju vrijednosti zabilježene na razini natkoljenice, što je kinematički

očekivano s obzirom na položaj navedenih segmenata unutar kinetičkog lanca donjih ekstremiteta.



Slika 4.4. Vršne linearne brzine segmenata odrazne noge (Vmax) u fazi odraza prije i poslije opterećenja

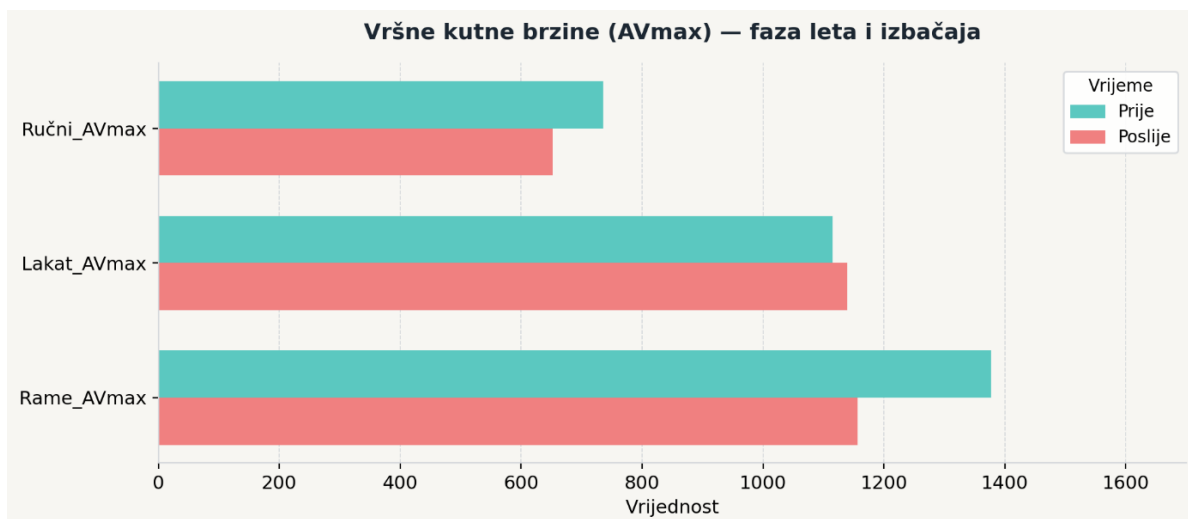
Tablica 4.11. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola iscrpljivanja izmjerenih u fazi leta i izbačaja lopte (N=100)

Varijabla	Protokol	AS	Minimum	Maksimum	SD
RAME_AV _{MAX}	prije	1377,3	598,1	2507,6	443,7
	poslije	1157,00	324,0	2212,2	371,0
LAKAT_AV _{MAX}	prije	1115,2	458,1	1846,3	305,2
	poslije	1139,2	435,0	2092,6	338,4
RUČNI_AV _{MAX}	prije	735,5	174,0	1452,5	266,2
	poslije	651,6	240,7	1484,9	253,3
RAME_V _{MAX}	prije	4,9	3,8	6,7	0,6
	poslije	4,8	3,1	6,0	0,7
NADL_V _{MAX}	prije	6,3	5,0	7,6	0,6
	poslije	6,2	5,1	8,0	0,6
PODL_V _{MAX}	prije	11,4	9,4	14,0	1,1
	poslije	11,3	9,3	14,2	1,0
ŠAKA_V _{MAX}	prije	12,6	10,4	16,1	1,1
	poslije	12,2	10,1	14,5	0,9
KOLJ_A _{MAX}	prije	121,8	97,7	142,7	9,00

	poslije	121,5	85,8	141,6	10,6
KUK_A _{MAX}	prije	64,3	25,8	83,9	13,1
	poslije	64,7	30,9	89,2	12,7
NATK_VIS _{MAX}	prije	158,4	140,7	179,6	8,5
	poslije	157,5	140,5	175,3	8,4
ŠAKA_VIS	prije	251,5	226,0	278,8	12,0
	poslije	247,8	216,4	269,8	12,0
VISINA SKOKA	prije	52,9	39,5	69,3	6,6
	poslije	50,8	35,3	61,8	6,8
DULJINA SKOKA	prije	238,2	174,0	327,0	33,7
	poslije	238,4	177,0	308,0	31,3

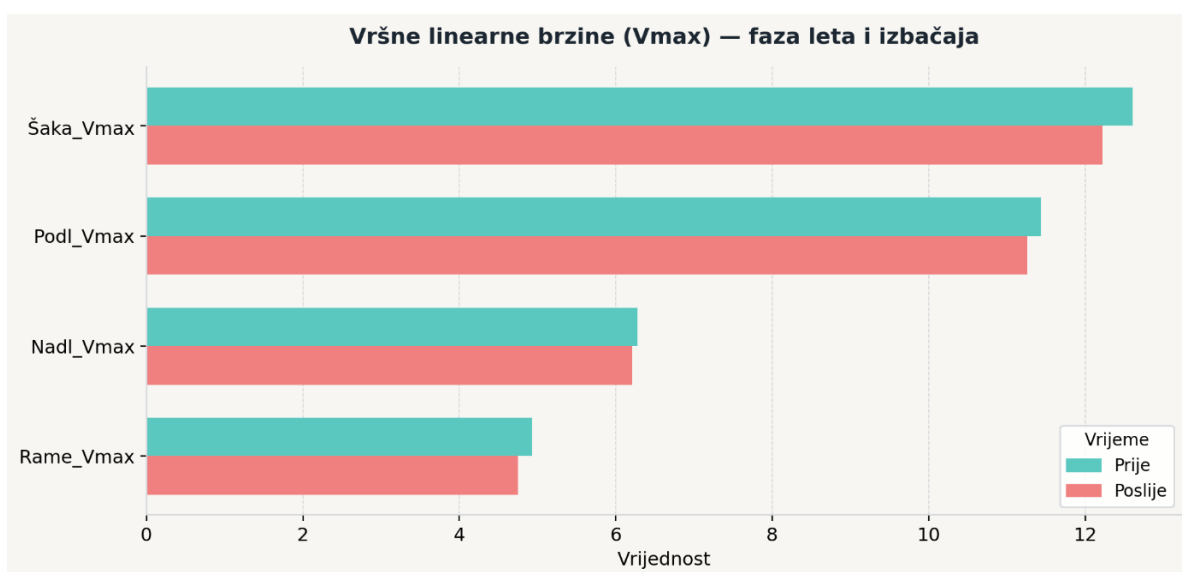
Tablica 4.11. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje kinematičkih varijabli izmjerenih u fazi leta i izbačaja lopte, s usporedbom vrijednosti dobivenih prije i nakon protokola opterećenja, na uzorku od 100 šutova u svakom uvjetu mjerenja. Navedene varijable obuhvaćaju vršne kutne brzine zglobova gornjeg ekstremiteta šuterske ruke, vršne linearne brzine segmenata gornjeg ekstremiteta, kutove zglobova donjih ekstremiteta, maksimalne visine odabranih segmenata (natkoljenice zamašne noge i šake šuterske ruke) te prostorne pokazatelje skoka (visina i duljina skoka).

Prosječna vršna kutna brzina ramenog zgloba šuterske ruke (Rame_AV_{max}) prije opterećenja iznosila je $1377,3 \pm 443,7$ °/s (raspon 598,1 – 2507,6 °/s), a nakon opterećenja $1157,0 \pm 371,0$ °/s (raspon 324,0 – 2212,2 °/s). Prosječna vršna kutna brzina lakta šuterske ruke (Lakat_AV_{max}) prije opterećenja iznosila je $1115,2 \pm 305,2$ °/s (raspon 458,1 – 1846,3 °/s), a nakon opterećenja $1139,2 \pm 338,4$ °/s (raspon 435,0 – 2092,6 °/s). Prosječna vršna kutna brzina ručnog zgloba šuterske ruke (Ručni_AV_{max}) prije opterećenja iznosila je $735,5 \pm 266,2$ °/s (raspon 174,0 – 1452,5 °/s), a nakon opterećenja $651,6 \pm 253,3$ °/s (raspon 240,7 – 1484,9 °/s).



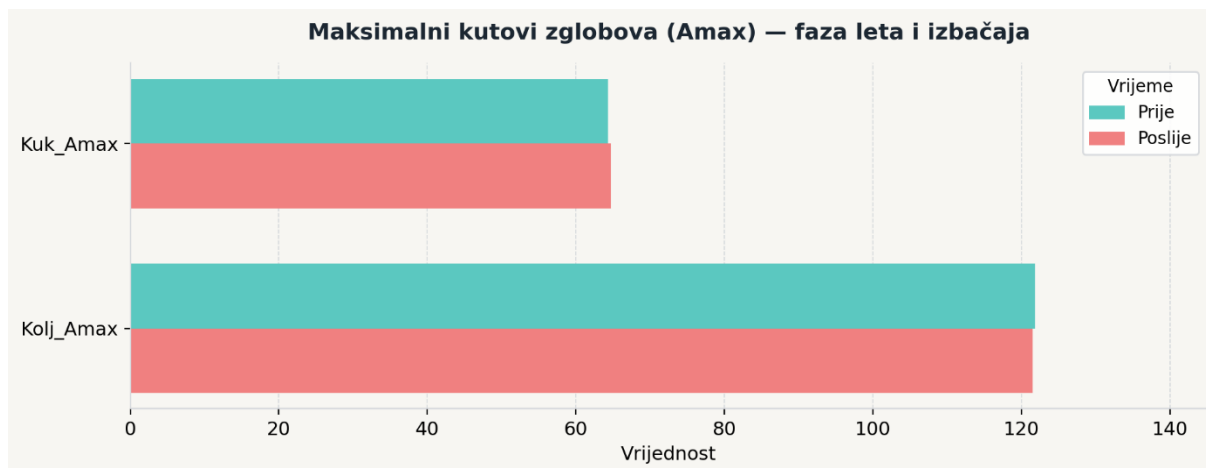
Slika 4.5. Vršne kutne brzine zglobova šuterske ruke (AVmax) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja

Prosječna vršna linearna brzina ramena šuterske ruke (Rame_Vmax) prije opterećenja iznosila je $4,9 \pm 0,6$ m/s (raspon 3,8 – 6,7 m/s), a nakon opterećenja $4,8 \pm 0,7$ m/s (raspon 3,1 – 6,0 m/s). Prosječna vršna linearna brzina nadlaktice šuterske ruke (Nadl_Vmax) prije opterećenja iznosila je $6,3 \pm 0,6$ m/s (raspon 5,0 – 7,6 m/s), a nakon opterećenja $6,2 \pm 0,6$ m/s (raspon 5,1 – 8,0 m/s). Prosječna vršna linearna brzina podlaktice šuterske ruke (Podl_Vmax) prije opterećenja iznosila je $11,4 \pm 1,1$ m/s (raspon 9,4 – 14,0 m/s), a nakon opterećenja $11,3 \pm 1,0$ m/s (raspon 9,3 – 14,2 m/s). Prosječna vršna linearna brzina šake šuterske ruke (Šaka_Vmax) prije opterećenja iznosila je $12,6 \pm 1,1$ m/s (raspon 10,4 – 16,1 m/s), a nakon opterećenja $12,2 \pm 0,9$ m/s (raspon 10,1 – 14,5 m/s).



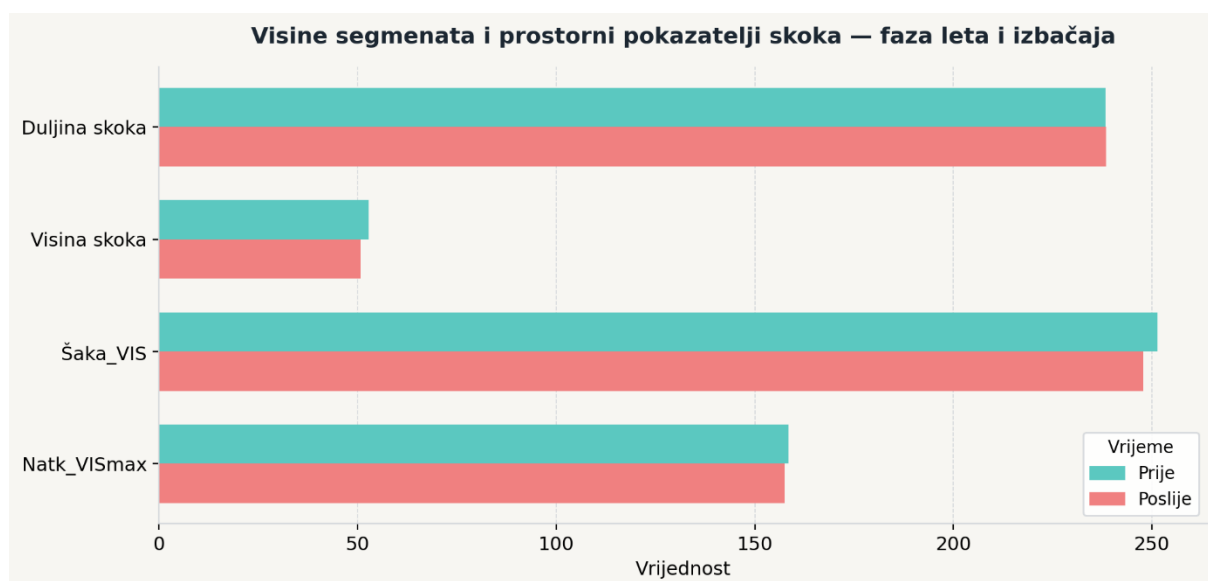
Slika 4.6. Vršne linearne brzine segmenata šuterske ruke (Vmax) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja

Prosječni maksimalni kut koljena zamašne noge (Kolj_Amax) prije opterećenja iznosio je $121,8 \pm 9,0^\circ$ (raspon $97,7 - 142,7^\circ$), a nakon opterećenja $121,5 \pm 10,6^\circ$ (raspon $85,8 - 141,6^\circ$). Prosječni maksimalni kut kuka zamašne noge (Kuk_Amax) prije opterećenja iznosio je $64,3 \pm 13,1^\circ$ (raspon $25,8 - 83,9^\circ$), a nakon opterećenja $64,7 \pm 12,7^\circ$ (raspon $30,9 - 89,2^\circ$).



Slika 4.7. Maksimalni kutovi zglobova zamašne noge (Amax) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja

Prosječne vrijednosti maksimalne visine natkoljenice zamašne noge (Natk_VISmax) prije protokola iscrpljivanja iznose $158,4 \pm 8,5$ cm, s rasponom vrijednosti od 140,7 do 179,6 cm, dok nakon protokola iscrpljivanja iznose $157,5 \pm 8,4$ cm, s rasponom vrijednosti od 140,5 do 175,3 cm. Prosječne vrijednosti visine šake šuterske ruke u trenutku izbačaja (Šaka_VIS) prije protokola iscrpljivanja iznose $251,5 \pm 12,0$ cm, s rasponom vrijednosti od 226,0 do 278,8 cm, dok nakon protokola iscrpljivanja iznose $247,8 \pm 12,0$ cm, s rasponom vrijednosti od 216,4 do 269,8 cm. Prosječne vrijednosti visine skoka prije protokola iscrpljivanja iznose $52,9 \pm 6,6$ cm, s rasponom vrijednosti od 39,5 do 69,3 cm, dok nakon protokola iscrpljivanja iznose $50,8 \pm 6,8$ cm, s rasponom vrijednosti od 35,3 do 61,8 cm. Prosječne vrijednosti duljine skoka prije protokola iscrpljivanja iznose $238,2 \pm 33,7$ cm, s rasponom vrijednosti od 174,0 do 327,0 cm, dok nakon protokola iscrpljivanja iznose $238,4 \pm 31,3$ cm, s rasponom vrijednosti od 177,0 do 308,0 cm.



Slika 4.8. Visine segmenata i prostorni pokazatelji skoka u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja

Tablica 4.12. Osnovni deskriptivni pokazatelji varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u završnoj fazi (N = 100)

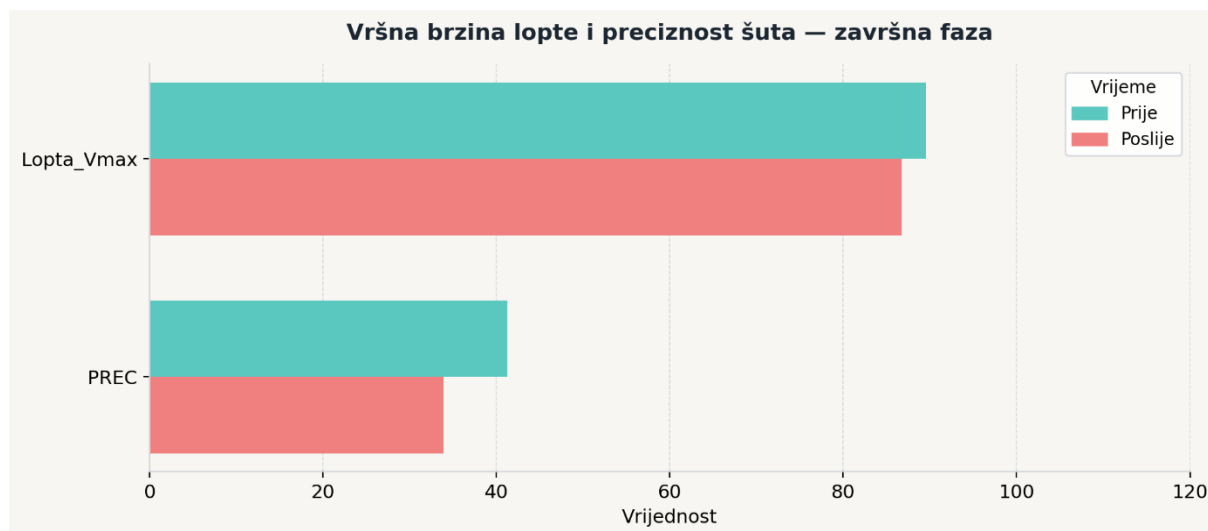
Varijabla	Protokol	AS	Minimum	Maksimum	St. dev.
Lopta_V _{max}	prije	89,5	69,6	110,7	7,0
	poslije	86,7	68,6	108,8	6,9
PREC	prije	41,3	-7,1	138,9	31,3
	poslije	33,9	-6,1	133,1	27,5

Tablica 4.12. prikazuje osnovne deskriptivne pokazatelje varijabli izmjerenih u završnoj fazi skok šuta, s usporedbom vrijednosti dobivenih prije i nakon protokola opterećenja, na uzorku od 100 šutova u svakom uvjetu mjerenja. Navedene varijable obuhvaćaju vršnu brzinu lopte nakon izbačaja te preciznost šuta.

Prosječna vršna brzina lopte (Lopta_V_{max}) prije opterećenja iznosila je $89,5 \pm 7,0$ km/h (raspon 69,6 – 110,7 km/h), a nakon opterećenja $86,7 \pm 6,9$ km/h (raspon 68,6 – 108,8 km/h). Standardna devijacija ove varijable ostaje ujednačena u oba uvjeta mjerenja, što upućuje na sličnu razinu homogenosti distribucije rezultata prije i nakon opterećenja.

Prosječna preciznost šuta (PREC) prije opterećenja iznosila je $41,3 \pm 31,3$ cm (raspon od -7,1 do 138,9 cm), a nakon opterećenja $33,9 \pm 27,5$ cm (raspon od -6,1 do 133,1 cm). Negativne minimalne vrijednosti ove varijable u oba uvjeta mjerenja odražavaju smjer odstupanja lopte od ciljane zone, pri čemu vrijednosti ispod nule

označavaju šutove koji su prošli s suprotne strane referentne točke mjerenja. Visoka standardna devijacija varijable preciznosti šuta upućuje na izraženu interindividualnu varijabilnost unutar uzorka.



Slika 4.9. Vršna brzina lopte (Lopta_Vmax) i preciznost šuta (PREC) u završnoj fazi prije i poslije opterećenja

Tablica 4.13. Rezultati t-testa za zavisne uzorke i analize varijance (F-vrijednosti) za brzinu lopte i preciznost šuta prije i nakon protokola opterećenja

Varijabla	Protokol	AS ± SD	t (17)	F (1,17)	p
Lopta_V _{max}	prije	89,0 ± 5,9 km/h	3,62	13,1	0,0021
	poslije	86,2 ± 5,8 km/h			
PREC	prije	41,3 ± 20,7 cm	1,68	2,81	1,112
	poslije	33,6 ± 16,5 cm			

Tablica 4.13 prikazuje prosječne vrijednosti i standardne devijacije brzine lopte i preciznosti šuta po ispitaniku u uvjetima prije i nakon protokola opterećenja, zajedno s rezultatima uparenog t-testa i odgovarajućim F-vrijednostima. Kod brzine lopte utvrđen je statistički značajan pad prosječne vrijednosti s $89,0 \pm 5,9$ km/h na $86,2 \pm 5,8$ km/h ($t(17) = 3,62$; $F(1,17) = 13,1$; $p = 0,0021$), dok je kod preciznosti šuta prosječno odstupanje od centra cilja smanjeno s $41,3 \pm 20,7$ cm na $33,6 \pm 16,5$ cm, ali ta razlika nije dosegla razinu statističke značajnosti ($t(17) = 1,68$; $F(1,17) = 2,81$; $p = 0,112$).

Prije provedbe inferencijalnih analiza provjereni su preduvjeti normalnosti distribucije i homogenosti varijanci za sve analizirane varijable. Rezultati Kolmogorov-Smirnovljevih/Shapiro-Wilkovih i Leveneovih testova pokazali su da većina varijabli zadovoljava pretpostavke za primjenu parametrijskih postupaka, uz nekoliko iznimki kod kojih su odstupanja bila blaga; detaljni rezultati prikazani su u Tablici 4.14.

Tablica 4.14. Rezultati Shapiro-Wilk testa normalnosti distribucije i Levenovog testa homogenosti varijanci za kinematičke i izvedbene varijable skok šuta u uvjetima prije i nakon protokola opterećenja

Varijabla	Shapiro-Wilk test normalnosti				Levenov test homogenosti varijanci	
	W (prije)	p (prije)	W (poslije)	p (poslije)	F	p
Pelvis_Vmax (m/s)	0,965	0,010	0,975	0,055	0,118	0,732
Gležanj_AVmax (°/s)	0,984	0,278	0,961	0,005	0,283	0,596
Koljeno_AVmax (°/s)	0,987	0,436	0,983	0,218	3,089	0,080
Kuk_AVmax (°/s)	0,868	<0,001	0,838	<0,001	0,173	0,678
Tkont (ms)	0,959	0,004	0,953	0,001	0,947	0,332
Natk_Vmax (m/s)	0,976	0,065	0,984	0,256	1,067	0,303
Potk_Vmax (m/s)	0,963	0,007	0,958	0,003	0,000	0,998
Rame_AVmax (°/s)	0,971	0,024	0,968	0,016	5,448	0,021
Lakat_AVmax (°/s)	0,981	0,170	0,987	0,429	0,288	0,592
Ručni_AVmax (°/s)	0,992	0,846	0,949	0,001	0,397	0,530
Rame_Vmax (m/s)	0,976	0,066	0,974	0,047	1,642	0,202
Nadl_Vmax (m/s)	0,990	0,692	0,986	0,350	0,003	0,960
Šaka_Vmax (m/s)	0,974	0,041	0,983	0,221	4,560	0,034
Kolj_Amax (°)	0,992	0,840	0,972	0,034	1,677	0,197
Kuk_Amax (°)	0,929	<0,001	0,975	0,050	0,009	0,926
Natk_VISmax (cm)	0,979	0,105	0,982	0,186	0,417	0,519
Šaka_VIS (cm)	0,979	0,102	0,973	0,040	0,330	0,566
Visina skoka (cm)	0,963	0,006	0,974	0,045	2,086	0,150
Duljina skoka (cm)	0,984	0,265	0,981	0,150	0,326	0,569
Lopta_Vmax (km/h)	0,959	0,004	0,958	0,003	0,003	0,956

Varijabla	Shapiro-Wilk test normalnosti				Levenov test homogenosti varijanci	
	W (prije)	p (prije)	W (poslije)	p (poslije)	F	p
Preciznost/PREC (cm)	0,942	<0,001	0,887	<0,001	1,760	0,186

W – statistika Shapiro-Wilk testa, p – razina statističke značajnosti, F – statistika Levenovog testa; vrijednosti označene crvenom bojom upućuju na statistički značajno odstupanje ($p < 0,05$)

Prisutnost statistički značajnih odstupanja od normalnosti u pojedinim varijablama interpretirana je u kontekstu robusnosti primijenjenih parametrijskih testova (ANOVA, t-test za zavisne uzorke) na dovoljno velikom uzorku mjerenja ($N = 100$ po uvjetu). Levenov test pokazuje homogenost varijanci za sve varijable osim za Rame_AVmax ($p = 0,021$) i Šaka_Vmax ($p = 0,034$), pri čemu su navedena odstupanja uzeta u obzir pri interpretaciji rezultata.

Rezultati testova normalnosti distribucije pokazuju da većina analiziranih varijabli ima prihvatljiva ili granična odstupanja od normalnosti, što je u skladu s primjenom parametrijskih testova na uzorku $N = 100$ po uvjetu mjerenja. Levenov test homogenosti varijanci potvrdio je jednakost varijanci za sve varijable, osim za Rame_AVmax ($p = 0,021$) i Šaka_Vmax ($p = 0,034$), kod kojih je uočen blaži stupanj heterogenosti varijanci. Varijable Kuk_AVmax, Kuk_Amax i PREC pokazuju izraženija odstupanja od normalne distribucije, što je u skladu s visokom interindividualnom varijabilnošću ovih parametara.

Tablica 4.15. Rezultati MANOVA-e za ponovljena mjerenja

	Test	Vrijednost	F	P	η
grupa	Wilks	0,63	5,80	0,00*	0,37

*Vrijednost – vrijednost Wilksove lambde, F- distribucija F vrijednosti, p – nivo značajnosti, η^2 – mjera veličine učinka; * označene vrijednosti su značajne u pogrešku $p < 0,05$

Rezultati MANOVA-e za ponovljena mjerenja prikazani su u Tablici 4.15. Analiza je pokazala statistički značajnu razliku između šutova izvedenih prije i nakon protokola opterećenja ($F = 5,50$; $p < 0,01$; $\eta^2 = 0,37$). Za utvrđivanje razlika između uvjeta mjerenja na razini pojedinih varijabli primijenjena je analiza varijance za ponovljena mjerenja – ANOVA (Tablica 4.13).

Tablica 4.16. Rezultati ANOVA-e za ponovljena mjerenja i veličine učinka (η^2) kinematičkih varijabli parametara skok šuta mjerenih Xsens sustavom

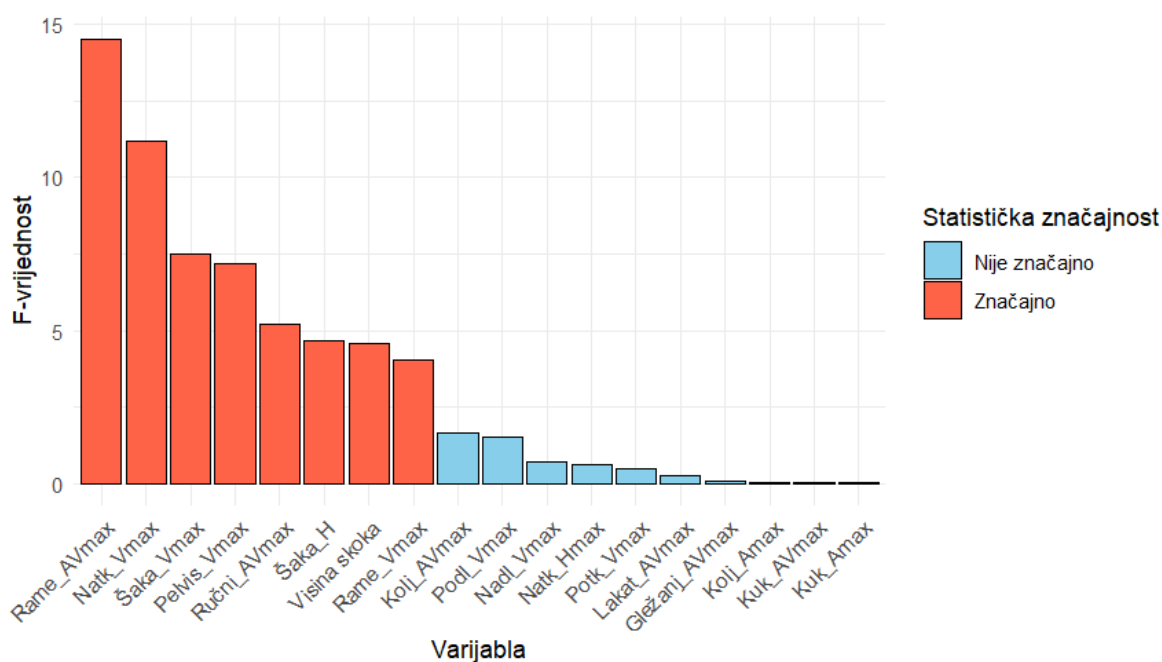
Varijabla	F	p	η^2	Interpretacija
Pelvis_V _{max}	7,17	0,01*	0.035	mali učinak
Gležanj_AV _{max}	0,07	0,80	0.00035	zanemariv
Kolj_AV _{max}	1,64	0,20	0.0082	mali
Kuk_AV _{max}	0,06	0,81	0.00030	zanemariv
Natk_V _{max}	11,19	0,00*	0.053	srednji
Potk_V _{max}	0,48	0,49	0.0024	zanemariv
Rame_V _{max}	4,03	0,04*	0.020	mali
Nadl_V _{max}	0,74	0,39	0.0037	zanemariv
Podl_V _{max}	1,51	0,22	0.0076	mali
Natk_VIS _{max}	0,61	0,44	0.0031	zanemariv
Kolj_A _{max}	0,06	0,81	0.00030	zanemariv
Kuk_A _{max}	0,05	0,83	0.00025	zanemariv
Šaka_V _{max}	7,51	0,01*	0.036	mali
Rame_AV _{max}	14,51	0,00*	0.068	srednji
Lakat_AV _{max}	0,28	0,60	0.0014	zanemariv
Ručni_AV _{max}	5,23	0,02*	0.026	mali
Šaka_VIS	4,66	0,03*	0.023	mali
Visina skoka	4,58	0,03*	0.022	mali

Tablica 4.16. prikazuje rezultate analize varijance za ponovljena mjerenja (ANOVA) primijenjene na kinematičke varijable skok šuta, s ciljem utvrđivanja statistički značajnih razlika i veličina učinka između uvjeta prije i nakon protokola opterećenja. Od ukupno 18 analiziranih varijabli, statistički značajne razlike utvrđene su za osam varijabli, pri čemu većina bilježi mali do srednji učinak fiziološkog opterećenja.

U varijablama donjeg dijela kinematičkog lanca statistički značajne razlike utvrđene su za Pelvis_V_{max} ($F = 7,17$; $p = 0,01$; $\eta^2 = 0,035$, mali učinak) i Natk_V_{max} ($F = 11,19$; $p < 0,01$; $\eta^2 = 0,053$, srednji učinak), što ukazuje na mjerljiv, ali ograničen utjecaj umora na brzinu zdjelice i natkoljenice odrazne noge. U skupini varijabli gornjeg

ekstremiteta statistički značajne razlike utvrđene su za Rame_Vmax ($F = 4,03$; $p = 0,04$; $\eta^2 = 0,020$, mali učinak), Šaka_Vmax ($F = 7,51$; $p = 0,01$; $\eta^2 = 0,036$, mali učinak), Rame_AVmax ($F = 14,51$; $p < 0,01$; $\eta^2 = 0,068$, srednji učinak) te Ručni_AVmax ($F = 5,23$; $p = 0,02$; $\eta^2 = 0,026$, mali učinak), što sugerira da umor selektivno usporava rotacijske i translacijske komponente gibanja u ramenom i ručnom zglobu šuterske ruke. Statistički značajne razlike uz mali učinak zabilježene su i za varijable Šaka_VIS ($F = 4,66$; $p = 0,03$; $\eta^2 = 0,023$) i Visina skoka ($F = 4,58$; $p = 0,03$; $\eta^2 = 0,022$), što upućuje na blagi pad maksimalne visine šake i ukupne visine skoka pod utjecajem opterećenja.

Za preostalih deset varijabli nisu utvrđene statistički značajne razlike između uvjeta mjerenja, a pripadne vrijednosti veličine učinka kreću se od zanemarivih do malih: Gležanj_AVmax ($F = 0,07$; $p = 0,80$; $\eta^2 = 0,00035$), Kolj_AVmax ($F = 1,64$; $p = 0,20$; $\eta^2 = 0,0082$), Kuk_AVmax ($F = 0,06$; $p = 0,81$; $\eta^2 = 0,00030$), Potk_Vmax ($F = 0,48$; $p = 0,49$; $\eta^2 = 0,0024$), Nadl_Vmax ($F = 0,74$; $p = 0,39$; $\eta^2 = 0,0037$), Podl_Vmax ($F = 1,51$; $p = 0,22$; $\eta^2 = 0,0076$), Natk_VISmax ($F = 0,61$; $p = 0,44$; $\eta^2 = 0,0031$), Kolj_Amax ($F = 0,06$; $p = 0,81$; $\eta^2 = 0,00030$), Kuk_Amax ($F = 0,05$; $p = 0,83$; $\eta^2 = 0,00025$) te Lakat_AVmax ($F = 0,28$; $p = 0,60$; $\eta^2 = 0,0014$), što ukazuje da se ti parametri u promatranim uvjetima mjerenja relativno stabilno održavaju unatoč povišenom fiziološkom opterećenju.



Slika 4.10. Grafički prikaz rezultata ANOVA-e za ponovljena mjerenja: crveno označene varijable pokazuju statistički značajne razlike ($p < 0.05$) u biomehaničkim parametrima između mjerenja

Slika 4.10. prikazuje rezultate ANOVA-e za ponovljena mjerenja, gdje su analizirani različiti parametri kinematičkih varijabli gornjih, donjih ekstremiteta, prostorno vremenskih varijabli i izvedbenih varijabli. Na x-osi nalaze se nazivi varijabli brzine, kuta i visine pokreta, dok y-os prikazuje F-vrijednosti koje ukazuju na razinu statističke razlike između mjerenja. Boje stupaca jasno označavaju značajnost: crveni stupci predstavljaju varijable s p-vrijednostima manjim od 0.05 (statistički značajne), dok plavi označavaju one koje nisu značajne. Vizualno je istaknuto da su varijable poput Rame_AVmax, Natk_Vmax, Pelvis_Vmax, Šaka_Vmax, Ručni_AVmax, Šaka_h, Visina skoka, Rame_Vmax imale značajne razlike u mjerenjima.

Tablica 4.17. Kinematičke varijable faze odraza skok šuta prije i poslije opterećenja

Varijabla	Prije opterećenja	Poslije opterećenja	%	Obrazac promjene
Tkont	200,4 ± 19,4 ms	203,8 ± 20,6 ms	+1,7 %	12/20 ispitanika bilježi produljenje
Gležanj_AVmax	597,1 ± 198,4 °/s	604,09 ± 180,2 °/s	+1,2 %	nema skupnog pada; 1 ispitanik +131,8% kompenzacija
Koljeno_AVmax	554,8 ± 101,7 °/s	537,8 ± 85,1 °/s	-3,1 %	jedini konzistentni negativni trend; 5 ispitanika > -9 %
Kuk_AVmax	515,5 ± 166,8 °/s	521,4 ± 174,6 °/s	+1,1 %	nema pada – otpornost ili kompenzacija
Natk_Vmax	5,0 ± 0,7 m/s	4,7 ± 0,6 m/s	-6,4 %	najveći pad u fazi odraza; 16/20 pada
Potk_Vmax	6,6 ± 1,2 m/s	6,8 ± 1,1 m/s	+1,7 %	moгуća distalna kompenzacija za pad natkoljenice

Tablica 4.17. prikazuje deskriptivne vrijednosti kinematičkih varijabli faze odraza skok šuta prije i nakon protokola opterećenja, zajedno s postotnim promjenama i obrascima individualnih odgovora. Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) blago se povećalo s 200,4 ± 19,4 ms na 203,8 ± 20,6 ms (+1,7%), pri čemu 12 od 20 ispitanika bilježi produljenje trajanja kontakta. Kutna brzina skočnog zgloba odrazne noge (Gležanj_AVmax) pokazuje minimalno povećanje (+1,2%), bez skupnog pada, uz jedan izraženi slučaj porasta od 131,8%, što upućuje na izraženu individualnu varijabilnost.

Maksimalna kutna brzina koljena odrazne noge (Koljeno_AVmax) smanjila se za 3,1%, pri čemu ova varijabla predstavlja jedini konzistentni negativni trend u fazi

odraza, s pet ispitanika koji bilježe pad veći od 9%. Kutna brzina kuka odrazne noge (Kuk_AVmax) ostaje stabilna (+1,1%), bez skupnog pada, dok maksimalna linearna brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax) pokazuje najveći pad u fazi odraza (–6,4%), pri čemu 16 od 20 ispitanika bilježi smanjenje vrijednosti. Nasuprot tomu, maksimalna brzina potkoljenice odrazne noge (Potk_Vmax) blago se povećala (+1,7%), što ukazuje na mogućnost distalnog kompenzacijskog povećanja brzine potkoljenice unatoč padu brzine natkoljenice.

Tablica 4.18. Kinematičke varijable faze leta i izbačaja skok šuta prije i poslije opterećenja

Varijabla	Prije opterećenja	Poslije opterećenja	%	interpretacija
Rame_AVmax	1377,3 ± 443,7 °/s	1157,0 ± 371,0 °/s	–16,0 %	najveći pad; 10/20 ispitanika pada
Lakat_AVmax	1115,2 ± 305,2 °/s	1139,2 ± 338,4 °/s	+2,2 %	otporan na umor; moguća kompenzacija
Ručni_AVmax	735,5 ± 266,2 °/s	651,6 ± 253,3 °/s	–11,4 %	drugi najveći pad; 1 isp. +190% kompenzacija
Rame_Vmax	4,9 ± 0,6 m/s	4,8 ± 0,7 m/s	–3,7 %	konzistentan pad
Nadl_Vmax	6,3 ± 0,6 m/s	6,2 ± 0,6 m/s	–1,1 %	minimalan pad
Podl_Vmax	11,4 ± 1,1 m/s	11,3 ± 1,0 m/s	–1,5 %	minimalan pad
Šaka_Vmax	12,6 ± 1,1 m/s	12,2 ± 0,9 m/s	–3,1 %	biomehanički relevantan pad
Šaka_VIS	251,5 cm	247,8 cm	–1,5 %	šaka 3,7 cm niže pri izbačaju
Visina skoka	37,5 cm	36,3 cm	–3,2 %	konzistentan pad vertikalne komponente
Duljina skoka	238,2 cm	238,4 cm	+0,1 %	nema promjene
Kuk_Amax	64,3°	64,7°	+0,6 %	stabilno
Kolj_Amax	121,8°	121,5°	–0,3 %	stabilno

*AVmax – maksimalna kutna brzina segmenta/zgloba; Vmax – maksimalna linearna brzina segmenta; VIS – visina šake u trenutku izbačaja lopte; Amax – maksimalni kut u promatranom zglobo; vrijednosti prije i poslije opterećenja prikazane su kao aritmetička sredina ± standardna devijacija, osim varijabli za koje standardna devijacija nije navedena u tablici; pozitivne vrijednosti (%) označavaju povećanje, a negativne vrijednosti (%) smanjenje vrijednosti poslije opterećenja u odnosu na stanje prije opterećenja.

Tablica 4.18. prikazuje deskriptivne vrijednosti kinematičkih varijabli faze leta i izbačaja skok šuta prije i nakon protokola opterećenja, uz postotne promjene i sažete informacije o obrascima individualnih odgovora. Maksimalna kutna brzina u ramenom zglobo šuterske ruke (Rame_AVmax) smanjila se za 16,0%, pri čemu polovica

ispitanika (10/20) bilježi pad, dok Ručni_AVmax bilježi drugi najveći pad (−11,4%), uz jedan izražen kompenzacijski porast pojedinačnog ispitanika. Nasuprot tome, Lakat_AVmax pokazuje blago povećanje (+2,2%), što upućuje na relativnu otpornost lakta na umor i potencijalnu kompenzaciju u završnoj fazi izbačaja.

Linearne brzine segmenata gornjeg ekstremiteta pokazuju pretežito male padove: Rame_Vmax (−3,7%) bilježi konzistentan pad, dok Nadl_Vmax (−1,1%) i Podl_Vmax (−1,5%) pokazuju minimalne promjene. Maksimalna brzina šake (Šaka_Vmax) smanjuje se za 3,1%, što predstavlja biomehanički relevantan pad u krajnjem distalnom segmentu koji neposredno određuje brzinu lopte. Maksimalna visina šake pri izbačaju (Šaka_VIS) smanjuje se za 1,5% (oko 3,7 cm), a visina skoka za 3,2%, što ukazuje na konzistentan pad vertikalne komponente izvedbe, dok duljina skoka praktički ne pokazuje promjenu (+0,1%). Maksimalni kutovi u kuku i koljenu zamašne noge (Kuk_Amax, Kolj_Amax) ostaju stabilni (promjene $\leq 0,6\%$), što sugerira očuvanje osnovne amplitudne strukture pokreta u završnoj fazi leta.

Tablica 4.19. Vremenski razmaci između postizanja vršnih linearnih brzina susjednih segmenata kinetičkog lanca skok šuta prije i poslije opterećenja

Segmentni par kinetičkog lanca	Prije opterećenja (ms)	Poslije opterećenja (ms)	Δ (ms)
natkoljenica → rame	+209,9 $\pm$ 140,7	+224,4 $\pm$ 123,1	+14,5
rame → nadlaktica	+19,6 $\pm$ 68,3	+31,1 $\pm$ 77,5	+11,5
nadlaktica → podlaktica	+9,7 $\pm$ 19,4	+8,6 $\pm$ 13,8	−1,1
podlaktica → šaka	+21,8 $\pm$ 22,8	+24,0 $\pm$ 19,9	+2,2
Ukupno: natkoljenica → šaka	+278,7	+286,0	+7,3

*ms – milisekunde, Δ – razlika između uvjeta poslije i prije opterećenja (Δ = poslije – prije), vrijednosti su prikazane kao aritmetička sredina $\pm$ standardna devijacija; pozitivne vrijednosti (+) označavaju ispravan proksimalno-distalni slijed aktivacije (proksimalniji segment postiže vršnu linearnu brzinu prije distalnijeg segmenta); negativna vrijednost Δ označava neznatno skraćanje vremenskog razmaka između segmenata pod opterećenjem

Tablica 4.19. prikazuje vremenske razmake između postizanja vršnih linearnih brzina susjednih segmenata kinetičkog lanca skok šuta u uvjetima prije i poslije opterećenja. Pozitivne vrijednosti svih segmentnih parova u oba uvjeta potvrđuju ispravan proksimalno-distalni redoslijed aktivacije – natkoljenica, rame, nadlaktica,

podlaktica, šaka. Ukupni vremenski raspon kinetičkog lanca iznosi +278,7 ms prije i +286,0 ms nakon opterećenja.

Za varijable u kojima se promatraju razlike jedne varijable između dva zavisna uzorka koristio se t-test za zavisne uzorke (Tablica 4.20).

Tablica 4.20. Rezultati t-testa za zavisne uzorke i veličine učinka (Cohenov d) za izvedbene varijable parametara skok šuta

Varijabla	Mean Diff.	SD	t	p	d	interpretacija
Tkont	-3,40	17,04	-2,00	0,04*	-0.45	mali do srednji učinak
Duljina skoka	-0,20	28,01	-0,07	0,94	-0.2	zanemariv učinak
Lopta_ V _{max}	2,81	4,35	6,46	0,00*	1.44	vrlo veliki učinak
PREC	7,35	37,69	1,95	0,05	0.44	mali do srednji učinak

*Tkont – trajanje kontakta s podlogom, Duljina skoka – duljina skoka, Lopta_ V_{max} – maksimalna brzina lopte nakon izbačaja, PREC – preciznost šuta, Mean Diff. – razlika prosječnih vrijednosti između dvaju mjerenja, SD – prosječno odstupanje rezultata od AS, t – t vrijednost; p – nivo značajnosti

* označene vrijednosti su značajne u pogrešku $p < 0,05$

Tablica 4.20. prikazuje rezultate t-testa za zavisne uzorke primijenjenog na četiri varijable skok šuta, uz procjenu veličine učinka Cohenovim d između uvjeta prije i nakon protokola opterećenja. Od četiri analizirane varijable, statistički značajne razlike uz najmanje mali učinak utvrđene su za trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) i brzinu lopte (Lopta_ Vmax).

Varijabla Tkont pokazuje statistički značajnu razliku ($t = -2,00$; $p = 0,04$; $d = -0,45$), s malim do srednjim učinkom, pri čemu se trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom u prosjeku produljilo za $3,40 \pm 17,04$ ms nakon opterećenja. Varijabla Lopta_ Vmax također pokazuje statistički značajnu razliku ($t = 6,46$; $p < 0,01$; $d = 1,44$), uz vrlo veliki učinak, što znači da je brzina lopte nakon opterećenja u prosjeku bila niža za $2,81 \pm 4,35$ km/h te da umor snažno i praktično relevantno narušava završni izvedbeni ishod skok šuta.

Za preostale dvije varijable nisu utvrđene statistički značajne razlike između uvjeta mjerenja. Duljina skoka pokazuje zanemariv učinak ($t = -0,07$; $p = 0,94$; $d = -0,20$), uz prosječnu razliku od $-0,20 \pm 28,01$ cm, što ukazuje da horizontalna komponenta skoka ostaje stabilna unatoč opterećenju. Varijabla PREC bilježi graničnu vrijednost p-parametra ($t = 1,95$; $p = 0,05$; $d = 0,44$), s malim do srednjim učinkom, pri čemu se prosječna preciznost šuta poboljšala za $7,35 \pm 37,69$ cm nakon opterećenja,

što upućuje na to da dio igrača pod umorom usporava šut, ali istodobno pojačava kontrolu i usmjeravanje lopte.

Tablica 4.21. Pokazatelji brzine lopte i preciznosti šuta prije i poslije opterećenja

Varijabla	Prije opterećenja	Poslije opterećenja	%	interpretacija
brzina lopte	89,5 ± 7,0 km/h	86,7 ± 6,9 km/h	-3,1 %	17/20 ispitanika bilježi pad
preciznost	41,3 ± 31,3 cm	33,9 ± 27,5 cm	-17,8 %	paradoksalno poboljšanje – kompromis brzine i preciznosti

Tablica 4.21. prikazuje promjene u brzini lopte i preciznosti šuta prije i nakon protokola opterećenja. Prosječna brzina lopte smanjila se s 89,5 ± 7,0 km/h na 86,7 ± 6,9 km/h (-3,1%), pri čemu 17 od 20 ispitanika bilježi pad vrijednosti, što ukazuje na konzistentan negativan učinak umora na završnu brzinu izbačaja. Istodobno je prosječno odstupanje pogodaka od ciljanog mjesta smanjeno s 41,3 ± 31,3 cm na 33,9 ± 27,5 cm (-17,8%), što upućuje na paradoksalno poboljšanje preciznosti šuta u uvjetu povišenog fiziološkog opterećenja. Ovakav obrazac – smanjenje brzine uz istodobno smanjenje odstupanja – sugerira kompromis između brzine i preciznosti, u kojem dio igrača pod utjecajem umora usporava izbačaj, ali ostvaruje bolju kontrolu usmjerenja lopte.

Tablica 4.22. prikazuje individualne obrasce promjene kinematičkih i izvedbenih varijabli pod opterećenjem, s prikazom broja ispitanika koji bilježe pad te broja ispitanika koji bilježe porast vrijednosti između uvjeta prije i nakon opterećenja, zajedno sa srednjim i najvećim izmjerenim postotnim promjenama unutar svake od tih skupina (N = 20).

Tablica 4.22. Individualni obrasci promjene kinematičkih i izvedbenih varijabli šuterske ruke i zamašne noge pod opterećenjem (N = 20)

Faza	Varijabla	N pada	Prosječan pad	Najveći pad	N porasta	Srednji porast	Najveći porast
zalet	Pelvis_Vmax	15/20	-4,8%	-16,8%	5/20	+1,8%	+3,6%
odraz	Natk_Vmax	17/20	-8,0%	-31,1%	3/20	+7,6%	+13,2%
odraz	Potk_Vmax	8/20	-6,7%	-13,8%	12/20	+8,5%	+38,5%
odraz	Tkont	10/20	-1,9%	-5,6%	10/20	+5,4%	+9,1%
leta	Rame_Vmax	14/20	-7,2%	-28,4%	6/20	+5,7%	+16,3%
leta	Nadl_Vmax	12/20	-4,5%	-19,5%	8/20	+4,5%	+16,3%

Faza	Varijabla	N pada	Prosječan pad	Najveći pad	N porasta	Srednji porast	Najveći porast
leta	Podl_Vmax	12/20	-4,0%	-16,3%	8/20	+2,7%	+4,8%
leta	Šaka_Vmax	13/20	-5,5%	-14,0%	7/20	+2,0%	+3,9%
leta	Visina skoka	13/20	-8,1%	-16,9%	7/20	+6,5%	+12,9%
završna	Brzina lopte	20/20	-3,1%	-14,6%	0/20	—	—
završna	Preciznost	13/20	-34,1%	-67,8%	7/20	+71,2%	+177,5%

*N pada – broj ispitanika kod kojih je zabilježen pad vrijednosti varijable nakon protokola opterećenja, Prosječan pad – prosječna postotna promjena vrijednosti u skupini ispitanika s padom, Najveći pad – maksimalno zabilježeno postotno smanjenje vrijednosti unutar uzorka, N porasta – broj ispitanika kod kojih je zabilježen porast vrijednosti varijable nakon protokola opterećenja, Srednji porast – prosječna postotna promjena vrijednosti u skupini ispitanika s porastom, Najveći porast – maksimalno zabilježeno postotno povećanje vrijednosti unutar uzorka, — označava da u navedenom mjerenju nije zabilježen ni jedan slučaj porasta vrijednosti, * vrijednosti su izražene kao postotna promjena u odnosu na mjerenje prije protokola opterećenja.

Napomena: Za varijable brzinskog tipa pad označava smanjenje vrijednosti pod opterećenjem. Za varijablu Preciznost pad označava smanjenje odstupanja od ciljane točke (poboljšanje preciznosti). Za varijablu Tkont porast označava produljenje trajanja kontakta.

Tablica 4.23. prikazuje Pearsonove koeficijente korelacije između vršne koncentracije laktata (30-15_Lak) i postotne promjene kinematičkih i izvedbenih varijabli između uvjeta prije i nakon opterećenja (N = 20).

Tablica 4.23. Pearsonovi koeficijenti korelacije između vršne koncentracije laktata (30-15_Lak) i prosječne postotne promjene kinematičkih varijabli šuterske ruke i zamašne noge pod opterećenjem (N = 20)

Varijabla	r	p	Δ (AS)
Rame_AVmax (°/s)	+0,079	0,742	-11,1%
Lakat_AVmax (°/s)	-0,027	0,910	+2,3%
Ručni_AVmax (°/s)	+0,150	0,529	-2,9%
Gležanj_AVmax (°/s)	-0,149	0,530	+6,8%
Koljeno_AVmax (°/s)	-0,201	0,396	-1,7%
Kuk_AVmax (°/s)	-0,323	0,165	+1,5%
Šaka_Vmax (m/s)	-0,271	0,247	-2,9%
Brzina lopte (km/h)	-0,372	0,106	-3,1%
Natk_Vmax (m/s)	+0,206	0,383	-5,7%
Pelvis_Vmax (m/s)	-0,254	0,279	-3,1%

Varijabla	r	p	Δ (AS)
Visina skoka (cm)	-0,256	0,276	-3,0%

r – Pearsonov koeficijent korelacije između vršne koncentracije laktata (30-15_Lak) i postotne promjene kinematičke varijable, p – razina statističke značajnosti, Δ (AS) – prosječna postotna promjena vrijednosti varijable između mjerenja prije i nakon protokola opterećenja, pozitivna vrijednost Δ označava porast, a negativna vrijednost pad u mjerenju nakon protokola opterećenja; kritična vrijednost za statističku značajnost pri N = 20 iznosi $r > 0,444$ ($p < 0,05$); nijedna od analiziranih varijabli nije dostigla razinu statističke značajnosti.

Napomena: N = 20. Kritična vrijednost za statističku značajnost: $r > 0,444$ ($p < 0,05$). Δ = postotna promjena između uvjeta prije i nakon opterećenja.

U Tablici 4.24 za svaku su varijablu prikazane vrijednosti Pearsonova koeficijenta korelacije (r) između vršne koncentracije laktata na testu 30-15_IKT (30-15_Lak) i postotne promjene između mjerenja prije i nakon opterećenja, razina statističke značajnosti (p) te prosječna postotna promjena vrijednosti varijable (Δ). Kritična vrijednost koeficijenta korelacije za statističku značajnost pri N = 20 iznosi $r > 0,444$ ($p < 0,05$), a nijedna od analiziranih varijabli nije dostigla razinu statističke značajnosti.

Za analizu po igračkim pozicijama odabrane su sve varijable za koje je MANOVA-om i naknadnom ANOVA-om za ponovljena mjerenja, odnosno t-testom za zavisne uzorke, utvrđena statistički značajna razlika između uvjeta prije i nakon opterećenja ($p < 0,05$) (tablica 4.23.). Time su uključene sve kinematičke i izvedbene varijable čija promjena pod opterećenjem ima statističku potporu u podacima: osam varijabli iz ANOVA-e (Rame_AVmax, Natk_Vmax, Šaka_Vmax, Pelvis_Vmax, Ručni_AVmax, Šaka_VIS, Rame_Vmax, Visina skoka) te dvije varijable iz t-testa (Tkont, Brzina lopte). Varijable koje nisu dosegle razinu statističke značajnosti isključene su iz analize jer bi usporedba njihovih promjena po igračkim pozicijama bila metodološki neosnovana.

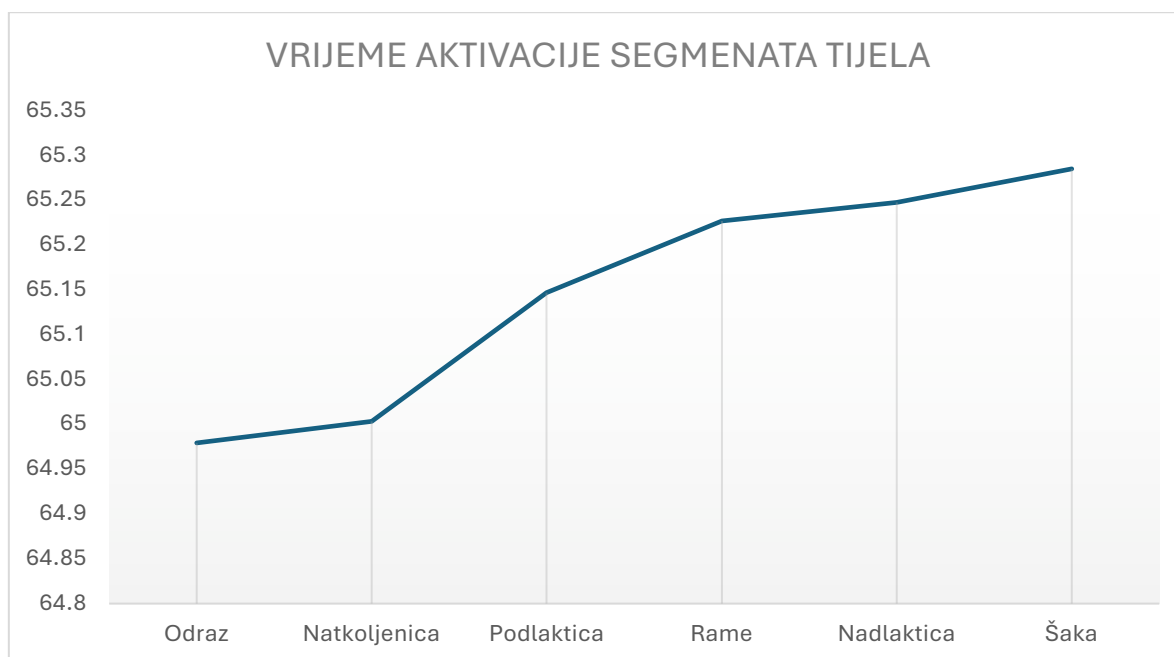
Tablica 4.24. Postotna promjena (Δ = AS $\pm$ SD) statistički značajnih kinematičkih i izvedbenih varijabli pod opterećenjem prema igračkim pozicijama

Faza	Varijabla	Test	Vanjski igrači (n = 13)	Krilni igrači (n = 4)	Kružni napadači (n = 3)
zalet	Pelvis_Vmax (m/s)	ANOVA*	-3,2% $\pm$ 5,7%	-3,0% $\pm$ 0,9%	-3,0% $\pm$ 2,3%
odraz	Natk_Vmax (m/s)	ANOVA**	-5,6% $\pm$ 12,0%	-3,5% $\pm$ 3,2%	-8,8% $\pm$ 9,4%
odraz	Tkont (ms)	t-test*	+1,4% $\pm$ 4,9%	+3,3% $\pm$ 4,5%	+1,4% $\pm$ 3,5%
faza leta	Rame_AVmax (°/s)	ANOVA**	-2,2% $\pm$ 32,0%	-34,6% $\pm$ 14,2%	-18,3% $\pm$ 25,6%

Faza	Varijabla	Test	Vanjski igrači (n = 13)	Krilni igrači (n = 4)	Kružni napadači (n = 3)
faza leta	Rame_Vmax (m/s)	ANOVA*	-5,8% ± 9,9%	+4,3% ± 8,3%	-2,9% ± 3,6%
faza leta	Ručni_AVmax (°/s)	ANOVA*	+3,0% ± 61,5%	-10,6% ± 19,1%	-17,7% ± 6,4%
faza leta	Šaka_Vmax (m/s)	ANOVA**	-3,8% ± 5,4%	-1,8% ± 4,7%	-0,3% ± 2,8%
faza leta	Šaka_VIS (cm)	ANOVA*	-1,1% ± 0,8%	-2,2% ± 1,7%	-2,1% ± 1,8%
faza leta	Visina skoka (cm)	ANOVA*	-1,5% ± 7,7%	-2,0% ± 11,6%	-10,7% ± 5,6%
završna	Brzina lopte (km/h)	t-test**	-3,5% ± 3,9%	-2,7% ± 3,3%	-2,0% ± 2,4%

Δ = postotna promjena između uvjeta prije i nakon opterećenja (negativna vrijednost označava pad, pozitivna vrijednost označava porast). Varijable su razvrstane prema fazi izvedbe skok šuta. Razina statističke značajnosti skupne analize: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. Analiza po igračkim pozicijama deskriptivne je naravi – razlike između pozicija nisu statistički testirane zbog malog uzorka po skupinama. N po pozicijama: vanjski igrači $n = 13$ (lijevi vanjski, desni vanjski, srednji vanjski); krilni igrači $n = 4$ (lijevo i desno krilo); kružni napadači $n = 3$ (pivot). AS = aritmetička sredina; SD = standardna devijacija.

Napomena: Δ = postotna promjena između uvjeta prije i nakon opterećenja (negativna vrijednost = pad, pozitivna = porast). * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ (razina značajnosti za skupnu analizu; pozicijska analiza je deskriptivna, bez statističkog testiranja razlika između pozicija). N po pozicijama: vanjski igrači $n = 13$ (L.vanjski, D.vanjski, srednji vanjski); krilni igrači $n = 4$ (lijevo i desno krilo); kružni napadači $n = 3$ (pivot).



Slika 4.11. Grafički prikaz redoslijeda postizanja vršnih linearnih brzina pojedinih segmenata tijela u fazi leta i izbačaja lopte kod skok šuta

Graf na slici 4.11. prikazuje redoslijed postizanja vršnih brzina pojedinih segmenata tijela. Na osi X prikazani su segmenti u proksimalno-distalnom redoslijedu – natkoljenica odrazne noge, rame, nadlaktica, podlaktica i šaka – dok os Y prikazuje

vrijeme postizanja vršne brzine svakog segmenta u odnosu na trenutak odraza. Rezultati jednoznačno potvrđuju proksimalno-distalni princip aktivacije: nakon inicijalnog odraza, postizanje vršnih brzina postupno se pomiče od proksimalnih prema distalnim segmentima, pri čemu svaki sljedeći segment dostiže svoju vršnu brzinu nešto kasnije od prethodnog. Takav vremenski raspored odražava karakterističnu sekvencu eksplozivnih bacačkih gibanja i skok šuta: početna horizontalna i vertikalna komponenta kinetičke energije generira se u donjim ekstremitetima i zdjelici, prenosi se kroz trup i rameni pojas prema nadlaktici i podlaktici te konačno rezultira najvećom linearnom brzinom u distalnom segmentu – šaci – u trenutku izbačaja lopte. Navedeni obrazac pokazuje da brzina lopte nije ishod izoliranog djelovanja šuterske ruke, već kumulativni rezultat vremenski usklađene i koordinirane aktivacije cijelog tijela, pri čemu sinergijsko ubrzanje kroz slijed segmentnih aktivacija omogućuje progresivnu akumulaciju i prijenos kinetičke energije prema distalnom kraju lanca, što se odražava u najvećoj linearnoj brzini šake ($\text{Šaka_Vmax} = 12,61 \text{ m/s}$ u uvjetima prije opterećenja).

Tablica 4.25. Vremenski razmaci vršnih linearnih brzina segmenata u proksimalno-distalnom redoslijedu prije i poslije opterećenja

Par segmenata	Prije opterećenja (ms)	Poslije opterećenja (ms)	$\Delta(\text{AS, ms})$
Natkoljenica → rame	$209,9 \pm 140,7$	$224,4 \pm 123,1$	+14,5
Rame → nadlaktica	$19,6 \pm 68,3$	$31,1 \pm 77,5$	+11,5
Nadlaktica → podlaktica	$9,7 \pm 19,4$	$8,6 \pm 13,8$	-1,1
Podlaktica → šaka	$21,8 \pm 22,8$	$24,0 \pm 19,9$	+2,2
Natkoljenica → šaka (ukupni raspon)	278,7 (izračunato)	286,0 (izračunato)	+7,3

$\Delta(\text{AS})$ – prosječna razlika između uvjeta prije i nakon opterećenja; pozitivne vrijednosti označavaju produljenje vremenskog razmaka između vršnih brzina segmenata, negativne vrijednosti skraćenje. Ukupni raspon predstavlja vremenski interval između postizanja vršne brzine natkoljenice i vršne brzine šake.

Tablica 4.25. prikazuje vremenske razmake između postizanja vršnih linearnih brzina pojedinih segmenata tijela u proksimalno-distalnom redoslijedu, u uvjetima prije i nakon opterećenja. Vrijednosti odgovaraju grafičkom prikazu na Slici 4.11 te numerički potvrđuju da je proksimalno-distalni redoslijed aktivacije (natkoljenica → rame → nadlaktica → podlaktica → šaka) očuvan u oba mjerenja, uz minimalne razlike u ukupnom trajanju sekvence.

5. RASPRAVA

Jedan od temeljnih fizioloških pokazatelja opterećenja korištenih u ovom istraživanju jest koncentracija laktata u kapilarnoj krvi (mmol/L), mjerena u trima vremenskim točkama: u mirovanju (Lac_mir), neposredno prije provedbe prvog seta šutova (1. prije_Lac) te po završetku protokola maksimalnog opterećenja u obliku progresivnog diskontinuiranog 30-15IFT-a (30-15_Lac). Porast koncentracije laktata s vrijednosti karakterističnih za fiziološko mirovanje na prosječno $12,2 \pm 3,1$ mmol/L nakon protokola 30–15IFT jasno potvrđuje da je primijenjeni protokol uspješno inducirao visoku razinu akutnog anaerobnog opterećenja, stvarajući time odgovarajuće uvjete za analizu kinematičkih promjena skok šuta u stanju umora.

Vrijednosti laktata u mirovanju izmjerene u ovom istraživanju ($1,2 \pm 0,4$ mmol/L) u potpunosti su u skladu s referentnim vrijednostima zabilježenim u usporedivim populacijama rukometaša. Belčić i suradnici (2021) proveli su istraživanje na uzorku od deset vrhunskih rukometaša Premijer hrvatske rukometne lige, demografski i antropometrijski usporedivih s uzorkom ovog istraživanja, te su zabilježili srednju vrijednost laktata u mirovanju od $1,3 \pm 0,5$ mmol/L. Navedeni nalaz posebno je relevantan s obzirom na to da je navedeno istraživanje koristilo identičan mjerni instrument i isti protokol opterećenja, što metodološku usporedivost čini iznimno visokom. Konzistentnost vrijednosti laktata u stanju mirovanja u elitnoj rukometnoj populaciji potvrđuju i Sporiš i suradnici (2014), koji su na reprezentativnom uzorku od 50 vrhunskih rukometaša 1. hrvatske rukometne lige i članova nacionalnih reprezentacija utvrdili karakteristično niske bazalne maksimalne vrijednosti laktata kao odraz visokorazvijene aerobne osnove u ovoj populaciji. Slično tome, Póvoas i suradnici (2017) u deskriptivnoj studiji fizioloških zahtjeva bilježe vrijednost laktata u mirovanju od $1,2 \pm 0,2$ mmol/L kod muških sudionika, što odgovara vrijednostima koje fiziologija sporta opisuje kao tipičan nalaz zdravih, sportski aktivnih odraslih muškaraca u stanju mirovanja. Akter i suradnici (2025), u istraživanju provedenom na rukometašicama, navode vrijednost laktata u mirovanju od $1,72 \pm 0,15$ mmol/L u eksperimentalnoj skupini prije trenažne intervencije, dok kontrolna skupina pokazuje usporediv trend, što upućuje na to da su vrijednosti laktata u mirovanju u rasponu od 1,0 do 2,0 mmol/L konzistentno prisutne u rukometnoj populaciji neovisno o spolu i razini natjecanja. Vrijednosti laktata u krvi ispod 2 mmol/L u stanju mirovanja smatraju

se fiziološki urednim nalazom u treniranih sportaša te su pokazatelj uravnotežene produkcije i uklanjanja laktata na razini skeletnih mišića.

Vrijednost laktata izmjerena neposredno prije provedbe prvog seta šutova ($1,9 \pm 0,7$ mmol/L) odražava blagi porast u odnosu na mirovnu vrijednost, što je fiziološki očekivano s obzirom na to da su ispitanici između mjerenja laktata u mirovanju i drugog mjerenja proveli standardizirano zagrijavanje. Belčić i suradnici (2021) bilježe srednju vrijednost laktata izmjerenog nakon prvog seta šutova od $2,07 \pm 1,16$ mmol/L, što je u dobroj suglasnosti s vrijednostima ovog istraživanja za prvu seriju testiranja. Niti u jednoj od navedenih točaka vrijednost laktata nije premašila prag od 4 mmol/L koji se u literaturi konzistentno koristi kao pokazatelj anaerobnog praga – što znači da su ispitanici u oba istraživanja u fazi tehničkog testiranja bili u aerobno-anaerobnoj prijelaznoj zoni, a ne u dominantno anaerobnom metaboličkom stanju. Taj fiziološki kontekst važan je za razumijevanje referentnog stanja u ovom istraživanju: izvedba skok šuta u uvjetu bez prethodnog opterećenja, uz vrijednosti laktata ispod anaerobnog praga, odgovara uvjetima na početku ili u ranoj fazi utakmice, kada metaboličko opterećenje još nije dostiglo razinu koja bi mogla narušiti živčano-mišićnu koordinaciju i tehničku kvalitetu izvedbe.

Nasuprot tomu, vrijednosti laktata izmjerene neposredno po završetku 30-15IFT-a ($12,2 \pm 3,1$ mmol/L) upućuju na intenzivnu aktivaciju anaerobnog glikoliznog metabolizma i razinu metaboličkog opterećenja koja je u literaturi povezana sa smanjenjem živčano-mišićne učinkovitosti. Navedeni rezultati podudaraju se s nalazima Belčića i suradnika (2021), koji su za identičan protokol na usporedivom uzorku zabilježili srednju vrijednost od $11,88 \pm 3,33$ mmol/L, što potvrđuje da je primijenjeni test bio jednako metabolički zahtjevan u oba istraživanja te da su postignute vršne vrijednosti laktata pouzdano ponovljive u uvjetima visokointenzivnog intermitentnog testiranja na ovoj populaciji. Mohorič i suradnici (2022), uspoređujući 30-15IFT s laboratorijskim testom na pokretnoj traci na uzorku od 19 vrhunskih rukometaša međunarodne razine, bilježe maksimalne vrijednosti laktata pri 30-15IFT od $8,94 \pm 3,12$ mmol/L, što je nešto niže od vrijednosti zabilježenih u ovom istraživanju. Razlika se može pripisati metodološkoj distinkciji u vremenskoj točki uzorkovanja: navedeni autori mjere laktate za vrijeme trajanja testa, dok su u ovom istraživanju, kao i u istraživanju Belčića i suradnika (2021), laktati mjereni neposredno po završetku testa, u trenutku vršnog nakupljanja vrijednosti. Ta vremenska razlika od samo nekoliko minuta može rezultirati razlikom u izmjerenim vrijednostima od 2 do 4 mmol/L,

što je u skladu s fiziološkim modelom prema kojemu koncentracija vršne vrijednosti laktata u kapilarnoj krvi nastupa s vremenskim odmakom od 1 do 3 minute po prestanku napora (Huang i sur., 2025).

Posebno je vrijedno istaknuti rad Sporiša i suradnika (2014), koji su na uzorku od 50 vrhunskih rukometaša 1. hrvatske rukometne lige i članova reprezentacije (prosječna dob: 20 ± 4 godina) mjerili maksimalnu koncentraciju laktata u krvi nakon visokointenzivnog testa trčanja s promjenama smjera na dionici od 300 jardi, kojim se, kao i testom korištenim u ovom istraživanju (30-15IFT), procjenjuje anaerobna izdržljivost igrača. Autori su utvrdili maksimalnu vrijednost laktata rukometaša od $13,7 \pm 1,8$ mmol/L, što je statistički niže od vrijednosti nogometaša ($14,7 \pm 2,1$; $p < 0,05$), ali bez statistički značajne razlike od košarkaša ($13,6 \pm 2,5$ mmol/L) kako su naveli u svom radu. Navedeni nalaz potvrdio je da rukometaši vrhunske razine pokazuju visok, ali za sport specifično niži kapacitet glikolizne produkcije laktata u usporedbi s nogometašima koji imaju veći ukupni volumen aerobno-anaerobnog treninga. Vrijednosti u radu Sporiša i suradnika ($13,7$ mmol/L) nešto su više od vrijednosti zabilježenih u ovom istraživanju ($12,2$ mmol/L), no razlika je metodološki objašnjiva: test 300 yard zahtijeva maksimalne napore u kratkim intervalima bez aktivnog oporavka, što intenzivira glikoliznu aktivaciju u usporedbi s progresivnim 30-15IFT koji uključuje 15-sekundne aktivne pauze između sprintova. Unatoč toj metodološkoj distinkciji, obje vrijednosti konzistentno potvrđuju da su rukometaši 1. HRL sposobni dostići vršne vrijednosti laktata između 12 i 14 mmol/L pri maksimalnom testnom opterećenju, čime je referentni okvir ovog istraživanja u potpunosti kontekstualiziran unutar poznatih fizioloških normi za ovu populaciju.

Gabrys i suradnici (2020), proučavajući fiziološke i motoričke karakteristike mladih rukometaša kategorija U17 ($n = 77$) i U19 ($n = 46$) u okviru inkrementalnog testa trčanja s promjenama smjera, navode da su maksimalne vrijednosti laktata u rasponu od 10 do 12 mmol/L tipičan fiziološki odziv za populaciju mladih rukometaša dobi od 16 do 21 godine, čime je i raspon zabilježen u ovom istraživanju potpuno u okvirima normi za mladu vrhunsku rukometnu populaciju. Pri tome su igrači kategorije U19 postigli statistički značajno više vrijednosti laktata u odnosu na igrače kategorije U17, osobito u pozicijama vanjske igre i pivota ($p < 0,001$), što autori tumače kao odraz višeg stupnja razvoja anaerobnog kapaciteta starijeg uzrasnog razreda uslijed duljeg i intenzivnijeg trenažnog procesa. Navedeni nalaz posredno je relevantan i za interpretaciju interindividualnih razlika maksimalnih vrijednosti laktata zabilježenih u

ovom istraživanju, s obzirom na to da je uzorak obuhvaćao igrače različitih igračkih pozicija i razina anaerobne pripremljenosti, što je moglo doprinijeti visokoj varijabilnosti izmjerenih vrijednosti (raspon 7,20 – 18,40 mmol/L).

Nuño i suradnici (2016) istraživali su učinak centralnog i perifernog fiziološkog umora na preciznost i brzinu šutiranja u rukometu primjenom specifičnog protokola kružnog tipa kojim se postupno inducira umor simuliranjem intenziteta stvarne utakmice – što ga čini metodološki usporedivim, ali ne identičnim protokolom s istraživanjem u ovoj disertaciji – te bilježe statistički značajan porast koncentracije laktata kroz sve etape protokola ($F = 1183$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,98$). Dobiveni rezultati upućuju na iznimno visoku osjetljivost laktata kao pokazatelja nakupljanja umora i potvrđuju njegovu ulogu kao pouzdanog biološkog pokazatelja unutarnjeg opterećenja u kontekstu tehničko-taktičke izvedbe rukometaša.

Na temelju usporedbe s navedenim istraživanjima može se zaključiti da vrijednost od $12,2 \pm 3,1$ mmol/L izmjerena nakon 30-15IFT-a pripada rasponu koji je u literaturi konzistentno opisan kao razina metaboličkog opterećenja pri kojoj dolazi do narušavanja mišićne homeostaze, smanjenja živčano-mišićne učinkovitosti i pada kapaciteta za precizno izvođenje složenih tehničkih elemenata poput skok šuta. Mohorič i suradnici (2021) pokazali su u analizi pozicijskih razlika vrhunskih rukometaša primjenom 30-15IFT-a da aerobni profil igrača znatno varira ovisno o igračkoj poziciji, što posredno upućuje na to da razlike u individualnim vršnim vrijednostima laktata – kakve su zabilježene i u ovom istraživanju (raspon 7,20 – 18,40 mmol/L) – mogu biti dijelom odraz pozicijsko-specifičnih fizioloških prilagodbi, a ne isključivo razlika u individualnim kapacitetima.

Visoke interindividualne razlike u maksimalnim vrijednostima laktata zabilježene u ovom istraživanju odražavaju heterogenost aerobnih i anaerobnih kapaciteta unutar uzorka, ali i biološku varijabilnost laktata kao mjerne veličine, na što upućuju Huang i suradnici (2025). Navedeni autori u preglednom radu o laktatnom metabolizmu i oporavku sportaša ističu da maksimalne vrijednosti laktata u visokointenzivnim intermitentnim sportovima poput rukometa tipično iznose između 8 i 14 mmol/L, ovisno o vrsti primijenjenog testa opterećenja i razini treniranosti ispitanika, te da vrijednosti iznad 10 mmol/L upućuju na značajno narušavanje mišićne homeostaze s mogućim posljedicama na brzinsko-koordinacijske sposobnosti. U tom kontekstu, srednja vrijednost od $12,2 \pm 3,1$ mmol/L izmjerena u ovom istraživanju potvrđuje da je primijenjeni protokol opterećenja inducirao visok stupanj metaboličkog opterećenja

organizma. Unatoč visokoj interindividualnoj varijabilnosti, svi su ispitanici dosegli vrijednosti laktata iznad 7,0 mmol/L, čime je osigurana dostatna razina fiziološkog opterećenja potrebna za standardiziranu usporedbu kinematičkih parametara skok šuta.

Zaključno, koncentracije laktata u mirovanju izmjerene u ovom istraživanju ($1,2 \pm 0,4$ mmol/L) sukladne su s vrijednostima koje su u ranijim istraživanjima zabilježene na vrhunskim rukometašima domaće i europske razine, a maksimalne vrijednosti laktata nakon 30-15IFT-a ($12,2 \pm 3,1$ mmol/L) smještaju primijenjeni protokol opterećenja u zonu visokog metaboličkog opterećenja koja premašuje prosječne uvjete rukometne utakmice, ali je usporediva s maksimalnim vrijednostima laktata zabilježenim pri maksimalnim anaerobnim opterećenjima u ovoj populaciji (Sporiš i sur., 2014; Gabrys i sur., 2020). Navedenim se potvrđuje metodološka valjanost protokola mjerenja korištenog u ovom istraživanju te pruža čvrsta fiziološka osnova za interpretaciju promjena kinematičkih parametara skok šuta zabilježenih u uvjetima induciranoga metaboličkog opterećenja.

S ciljem utvrđivanja je li viša razina metaboličkog opterećenja izravno povezana s većim padom kinematičkih i izvedbenih parametara skok šuta, provedena je Pearsonova korelacijska analiza između vršne koncentracije laktata pojedinih ispitanika i postotne promjene svake promatrane varijable (Tablica 4.17). Niti jedna od analiziranih kinematičkih varijabli nije statistički značajno korelirala s vršnom koncentracijom laktata (sve $p > 0,05$). Najveći, ali statistički neznajni koeficijent korelacije zabilježen je za brzinu lopte ($r = -0,372$; $p = 0,106$), što upućuje na tendenciju prema tome da ispitanici s višim maksimalnim vrijednostima laktata bilježe veći pad brzine lopte.

Odsutnost statistički značajnih korelacija između maksimalnih vrijednosti laktata i pada kinematičkih varijabli važan je i interpretacijski vrijedan nalaz koji produbljuje razumijevanje mehanizama umora u kontekstu skok šuta. Navedeni nalaz upućuje na to da razina metaboličkog opterećenja – mjerena koncentracijom laktata u kapilarnoj krvi – nije jedini ni primarni prediktor veličine kinematičkih promjena pod opterećenjem. Konzistentan je s razlikovanjem između perifernog metaboličkog umora, koji se odražava u vrijednostima laktata, i živčano-mišićnog umora koji neposredno određuje kvalitetu motoričke izvedbe (Thorlund i sur., 2008). Između ta dva oblika umora ne mora postojati linearna veza u uvjetima visokospecijaliziranih sportskih gibanja, što upućuje na to da kinetičke i kinematičke promjene nastale pod opterećenjem

odražavaju složene živčano-mišićne adaptacije koje nisu u potpunosti objašnjive razinom metaboličkog stresa samog po sebi. Moguće je da ispitanici s višim maksimalnim vrijednostima laktata posjeduju i veći anaerobni kapacitet koji im omogućuje dulje očuvanje živčano-mišićne funkcije unatoč visokom metaboličkom opterećenju – što bi objasnilo izostanak linearne veze između koncentracije laktata i veličine kinematičke promjene. Navedeni nalaz otvara važno istraživačko pitanje za buduća istraživanja: koji su individualni čimbenici – tehničke karakteristike bacačkog gibanja, razina živčano-mišićne otpornosti na umor ili stupanj sportske specijalizacije – primarni prediktori kinematičke stabilnosti skok šuta pod visokim fiziološkim opterećenjem. Habay i sur. (2023) u sustavnom pregledu potvrđuju da je interindividualna varijabilnost u odgovoru na umor sustavna i biološki uvjetovana pojava, a ne posljedica metodoloških nedostataka mjerenja.

Frekvencija srca (FS) mjerena je kao pokazatelj kardiovaskularnog odgovora organizma u četiri vremenske točke: u stanju mirovanja (FS_mir), tijekom izvođenja prvog niza šutova prije protokola opterećenja (1.prije_FS_max), neposredno po završetku 30-15IFT-a (30-15_FS_max) te neposredno nakon drugog niza skok šutova (2. poslije_FS_max). Rezultati ovog istraživanja pokazali su da je prosječna vrijednost frekvencije srca u stanju mirovanja iznosila $84,7 \pm 6,6$ otkucaja/min (raspon 68 – 94 otkucaja/min), vrijednost izmjerena neposredno nakon prvog seta šutova $162,0 \pm 14,4$ otkucaja/min (raspon 138 – 188 otkucaja/min), vrijednost izmjerena neposredno po završetku 30-15IFT-a $195,2 \pm 7,3$ otkucaja/min (raspon 180 – 205 otkucaja/min), dok je frekvencija srca izmjerena neposredno nakon drugog seta šutova iznosila $176,1 \pm 9,7$ otkucaja/min (raspon 158 – 199 otkucaja/min). Opisani obrazac porasta i pada frekvencije srca u vremenskom slijedu mjerenja odražava dinamičan kardiovaskularni odgovor na promjenjive razine metaboličkog opterećenja i u skladu je s fiziološkim modelima kardiovaskularnih prilagodbi na visokointenzivno intermitentno opterećenje.

Vrijednosti frekvencije srca u stanju mirovanja izmjerene u ovom istraživanju ($84,7 \pm 6,6$ otkucaja/min) u skladu su s referentnim vrijednostima koje se navode za populaciju mladih treniranih sportaša. Belčić i suradnici (2021), u istraživanju na uzorku od deset vrhunskih rukometaša primjenom identičnog protokola, bilježe vrijednost frekvencije srca u stanju mirovanja od $83,70 \pm 7,81$ otkucaja/min, što je gotovo istovjetno vrijednostima ovog istraživanja te dodatno potvrđuje homogenost fizioloških obilježja uzoraka obaju istraživanja. Vrijednosti frekvencije srca u stanju mirovanja između 70 i 90 otkucaja/min tipične su za populaciju mladih sportaša visoke razine

treniranosti i odražavaju određenu razinu aerobnih prilagodbi kardiovaskularnog sustava.

Vrijednosti frekvencije srca izmjerene neposredno nakon prvog seta skok šutova ($162,0 \pm 14,4$ otkucaja/min) upućuju na to da su ispitanici u toj vremenskoj točki bili u zoni visokog kardiovaskularnog opterećenja, bez dostizanja individualnih maksimalnih vrijednosti. Navedene vrijednosti odgovaraju intenzitetu zagrijavanja i preliminarnog testiranja te su u skladu s nalazima Belčića i suradnika (2021), koji bilježe $163,00 \pm 10,91$ otkucaja/min nakon prvog seta šutova. Mohorič i suradnici (2022), analizirajući fiziološke parametre vrhunskih rukometaša pri različitim razinama opterećenja 30-15IFT-a, ističu da vrijednosti frekvencije srca između 150 i 170 otkucaja/min odgovaraju zoni koja prethodi individualnom anaerobnom pragu, što je u skladu s vrijednostima laktata izmjerenima u ovoj točki testiranja ($1,91 \pm 0,68$ mmol/L), koje nisu premašile prag od 4 mmol/L.

Vrijednosti frekvencije srca izmjerene neposredno po završetku 30-15IFT-a ($195,2 \pm 7,3$ otkucaja/min) potvrđuju da je primijenjeni protokol opterećenja od ispitanika zahtijevao aktivaciju kardiovaskularnog sustava na razini bliskoj individualnom maksimumu. Belčić i suradnici (2021) bilježe gotovo istovjetnu vrijednost od $195,4 \pm 8,3$ otkucaja/min na uzorku iste populacije i pri istom protokolu, čime je visoka ponovljivost kardiovaskularnog odgovora na 30-15IFT u populaciji vrhunskih mladih rukometaša dodatno potvrđena. Michalsik i suradnici (2015) u istraživanju fiziološkog kapaciteta vrhunskih rukometaša bilježe prosječnu frekvenciju srca za vrijeme utakmice od 163 ± 5 otkucaja/min, što je znatno niže od vrijednosti zabilježenih u ovom istraživanju po završetku 30-15IFT-a. Navedena razlika nije neočekivana s obzirom na temeljnu metodološku razliku između maksimalnog testnog protokola koji za cilj ima dovođenje organizma do stanja umora i stvarnih uvjeta utakmice koji podrazumijevaju izmjenu visokointenzivnih napora s fazama nižeg intenziteta i aktivnog oporavka. Stoga vrijednosti bliske maksimalnoj frekvenciji srca izmjerene u ovom istraživanju potvrđuju da je primijenjeni protokol opterećenja dostigao razinu kardiovaskularnog opterećenja koja premašuje prosječne uvjete natjecanja, što je neophodan preduvjet za valjanost zaključaka o utjecaju fiziološkog umora na kinematičke parametre skok šuta.

Vrijednosti frekvencije srca izmjerene neposredno nakon drugog seta skok šuta ($176,1 \pm 9,7$ otkucaja/min) upućuju na djelomičan oporavak kardiovaskularnog sustava u kratkom vremenskom intervalu između završetka 30-15IFT-a i provedbe drugog seta

šutiranja. Usporedbom s maksimalnom frekvencijom srca izmjerenom pri 30-15IFT-u (195,2 otkucaja/min) vidljiv je pad od otprilike 19 otkucaja/min, koji je metodološki uvjetovan kratkim vremenskim odmakom između završetka protokola opterećenja i ponovnog mjerenja. Belčić i suradnici (2021) bilježe vrijednost od $171,40 \pm 7,04$ otkucaja/min nakon drugog seta šutova, što je nešto niže od vrijednosti ovog istraživanja, no oba nalaza sukladna su u opisivanju istog fiziološkog obrasca: unatoč djelomičnom padu frekvencije srca, ispitanici su i u fazi drugog seta šutiranja i dalje bili u zoni visokog kardiovaskularnog opterećenja, daleko iznad vrijednosti izmjerenih u stanju mirovanja i u prvom setu šutiranja. Taj fiziološki kontekst važan je za interpretaciju kinematičkih promjena skok šuta zabilježenih u uvjetima opterećenja jer visoka frekvencija srca prisutna pri drugom setu šutiranja ne odražava isključivo kardiovaskularno opterećenje, već posredno upućuje na još uvijek prisutno visoko metaboličko opterećenje mišićnog tkiva, što je u skladu s istovremeno izmjerenim maksimalnim vrijednostima laktata ($12,2 \pm 3,1$ mmol/L).

Visoke interindividualne razlike u vršnoj frekvenciji srca pri 30-15IFT-u (raspon 180 – 205 otkucaja/min) odražavaju poznatu biološku varijabilnost maksimalne frekvencije srca, koja je prema dostupnoj literaturi ponajprije određena genetskim čimbenicima i dobi ispitanika (Jensen i sur., 2017; Tanaka i sur., 2001). Unatoč toj varijabilnosti, činjenica da je svaki ispitanik dostigao vrijednost frekvencije srca iznad 180 otkucaja/min pri 30-15IFT-u potvrđuje da je razina kardiovaskularnog opterećenja bila dovoljno visoka i ujednačena unutar uzorka da bi se zaključci o utjecaju fiziološkog umora na tehničku izvedbu mogli smatrati metodološki valjano utemeljenima.

Subjektivni osjećaj umora (SOU) kvantificiran je u ovom istraživanju primjenom Borgove skale omjera kategorija sa 10 stupnjeva – CR-10 (Borg, 1982) – neposredno po završetku 30-15IFT-a. Prosječna vrijednost subjektivnog osjećaja umora iznosila je $8,4 \pm 1,0$ (raspon 7 – 10), što prema navedenoj skali odgovara razini napora opisanoj kao „jako teška” do „maksimalna”. Relativno visoka srednja vrijednost uz nisku standardnu devijaciju upućuje na to da je protokol opterećenja u većine ispitanika izazvao izrazito visok stupanj percipiranog napora uz malu interindividualnu varijabilnost, što je osobito značajno s obzirom na relativno visoku varijabilnost zabilježenu u objektivnim fiziološkim pokazateljima – maksimalnim vrijednostima laktata i maksimalnoj frekvenciji srca.

Vrijednosti subjektivnog osjećaja umora zabilježene u ovom istraživanju sukladne su s nalazima Nuña i suradnika (2016), koji su primjenom Borgove CR-10

skale u istraživanju učinka fiziološkog umora na tehničku izvedbu rukometaša zabilježili statistički visoko značajan porast percipiranog napora kroz sve etape rukometno-specifičnog protokola opterećenja. Navedeni autori potvrđuju temeljni fiziološki princip da subjektivni osjećaj umora raste sukladno s porastom objektivnih pokazatelja unutarnjeg opterećenja – frekvencije srca i koncentracije laktata u krvi – što je u skladu s psihofizičkim modelom na kojemu počiva Borgova CR-10 skala, a koji je u kineziološkoj literaturi konzistentno potvrđivan kao valjan i pouzdan pristup procjeni percipiranog napora pri visokointenzivnom tjelesnom radu (Borg, 1982; Williams, 2017). Klatt i suradnici (2021), istražujući fiziološke odgovore i oporavak rukometaša kategorije U20 i seniora nakon visokointenzivnog protokola istrčavanja sprinteva s promjenama smjera, bilježe istovremeni porast percipiranog napora i razine stresa neposredno po završetku protokola bez statistički značajnih razlika između dobnih skupina, što potvrđuje da je ta mjera osjetljiva i primjenjiva u rukometnoj populaciji različite dobi i razine pripremljenosti. Bauer i suradnici (2024), proučavajući interakciju između objektivnih i subjektivnih mjera umora u populaciji od 100 vrhunski treniranih rukometaša, pokazuju da subjektivna percepcija umora postaje osobito osjetljiv pokazatelj u uvjetima visokog opterećenja, kada korelacija između objektivnih i subjektivnih mjera postaje statistički značajna – što je u skladu s uvjetima maksimalnog testnog opterećenja primijenjenog u ovom istraživanju.

Posebno je metodološki važno razmotriti odnos između subjektivnog osjećaja umora i objektivnih fizioloških pokazatelja izmjerenih u ovom istraživanju. Prosječna vrijednost SOU od $8,4 \pm 1,0$ na Borgovoj CR-10 skali izmjerena je u vremenskoj točki u kojoj su istovremeno zabilježene maksimalne vrijednosti laktata od $12,2 \pm 3,1$ mmol/L i maksimalne frekvencija srca od $195,2 \pm 7,3$ otkucaja/min – dakle u uvjetima istovremeno maksimalnog metaboličkog i kardiovaskularnog opterećenja. Istovremeni porast sva tri pokazatelja unutarnjeg opterećenja prema vrijednostima karakterističnim za zonu maksimalnog napora pruža snažnu metodološku potvrdu da je primijenjeni protokol dostigao razinu fiziološkog opterećenja potrebnu za valjanost zaključaka o učinku umora na kinematičke parametre skok šuta. Važno je naglasiti da subjektivni osjećaj umora, kao višedimenzionalni produkt, ne odražava samo periferne metaboličke procese nego i središnju dimenziju umora – percipiranu težinu aktivacije živčano-mišićnog sustava i stupanj naprezanja potreban za održavanje zadane razine napora – čime postaje komplementarni i nezamjenjivi pokazatelj unutarnjeg opterećenja uz objektivne fiziološke mjere. Uz fiziološku komponentu, mentalni umor

može dodatno modulirati tehničku izvedbu sportaša, pri čemu sustavni pregledi potvrđuju njegovu negativnu ulogu na motoričku izvedbu u timskim sportovima (Sun i sur., 2021; Yuan i sur., 2023; Wu i sur., 2024). Staiano i sur. (2026) pokazali su da intervencija temeljena na svjesnoj prisutnosti može ublažiti učinke mentalnog umora na fizičku i kognitivnu izvedbu u vrhunskih rukometaša, što upućuje na psihofizičku prirodu umora kao integriranoga fenomena u ovom sportu.

Zaključno, vrijednost subjektivnog osjećaja umora izmjerena neposredno po završetku 30-15IFT-a ($8,4 \pm 1,0$) na Borgovoj CR-10 skali u skladu je s vrijednostima zabilježenim u metodološki usporedivim istraživanjima na rukometašima visoke razine, a u kombinaciji s objektivnim fiziološkim pokazateljima potvrđuje da je primijenjeni protokol opterećenja inducirao visok i standardiziran stupanj fiziološkog opterećenja, čime je osigurana metodološka osnova za interpretaciju kinematičkih promjena skok šuta nastalih kao posljedica toga opterećenja.

Kinematičke varijable: Faza zaleta

U fazi zaleta fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja analizirane kinematičke varijable – vršne linearne brzine zdjelice (Pelvis_Vmax).

Faza zaleta predstavlja pripremnu fazu skok šuta u kojoj igrač akumulira horizontalni impuls koji se u sljedećim fazama pretvara u vertikalnu i rotacijsku komponentu gibanja. Jedina mjerena varijabla u ovoj fazi bila je maksimalna brzina zdjelice (Pelvis_Vmax), izražena u metrima u sekundi (m/s). Zdjelica je odabrana kao mjerni segment jer prema modelu proksimalno-distalne sekvencijalne aktivacije predstavlja početnu kariku kinetičkog lanca – ona je prvi segment čija brzina dostiže maksimum i čija se kinetička energija zatim sukcesivno prenosi prema trupu, ramenu i distalnim segmentima šuterske ruke (Serrien i Baeyens, 2018; Wagner i sur., 2011).

Zdjelica u fazi zaleta izvodi kombinaciju translacijskog i rotacijskog gibanja: translacijsko kretanje u smjeru cilja (horizontalna komponenta zaleta) popraćeno je inicijalnom vanjskom rotacijom prema šuterskoj strani, što stvara preduvjete za naknadnu eksplozivnu unutarnju rotaciju u fazi leta i izbačaja. Brzina zdjelice u ovoj fazi rezultanta je dvaju istovremenih komponenti gibanja: translacijskog kretanja prema naprijed, koje je posljedica horizontalnog impulsa akumuliranog u zaletu, te inicijalne rotacije prema šuterskoj strani, koja priprema zdjelicu za eksplozivnu sekvencijalnu aktivaciju kinetičkog lanca u fazama koje slijede. Maksimalna vrijednost ove brzine dostiže se neposredno prije odraza – dakle u posljednjoj fazi kontakta odrazne noge s

podlogom, kada je horizontalni impuls zaleta maksimalan, a vertikalna komponenta skoka još nije dominantna.

Prosječna maksimalna brzina zdjelice u uvjetima prije opterećenja iznosi $5,7 \pm 0,5$ m/s, a u uvjetima nakon opterećenja $5,5 \pm 0,5$ m/s, što odgovara padu od 3,3 %. Wagner i suradnici (2011) na uzorku od 14 vrhunskih rukometaša utvrdili su da je maksimalna brzina centra težišta tijela u smjeru cilja – konceptualno analogna brzini zdjelice u fazi zaleta – statistički visoko značajno različita između skok šuta i ostalih tehnika bacanja ($p < 0,001$), što potvrđuje ključnu ulogu translacijskog impulsa zdjelice za konačnu brzinu lopte. Isti autori navode da visoka brzina centra težišta tijela u fazi zaleta statistički značajno korelira s brzinom lopte ($r > 0,70$), pri čemu je upravo translacijska komponenta zdjelice jedna od ključnih varijabli koje razlikuju vrhunske igrače od igrača niže razine.

Van den Tillaar i Ettema (2007) u trodimenzionalnoj analizi bacanja u rukometu potvrđuju da raniji nastup vršne brzine zdjelice statistički značajno korelira s većom brzinom lopte ($p < 0,05$), naglašavajući da bolji igrači pokreću zdjelicu ranije u fazi zaleta i na taj način osiguravaju veći vremenski interval za sekvencijalnu aktivaciju proksimalno-distalnog kinetičkog lanca. Serrien i Baeyens (2018) u sustavnom preglednom radu i meta-analizi o proksimalno-distalnoj sekvenci u rukometu potvrđuju da rotacija zdjelice dosljedno predvodi sva ostala kretanja kinetičkog lanca – aktivacija zdjelice nastupa statistički značajno ranije od rotacije trupa, pregiba trupa, unutarnje rotacije ramena i ekstenzije lakta.

Analiza individualnih podataka otkriva izrazite interindividualne razlike u maksimalnoj brzini zdjelice, ali i u obrascu njezine promjene pod opterećenjem. Najveće vrijednosti u skupini prije opterećenja kreću se između 6,4 i 6,7 m/s, dok najniže vrijednosti iznose između 4,9 i 5,4 m/s. Raspon od gotovo 1,8 m/s unutar istog uzorka upućuje na znatnu heterogenost u razini kinetičke energije akumulirane u fazi zaleta, a time i u potencijalnoj osnovi za sekvencijalnu aktivaciju kinetičkog lanca.

Osobito je analitički zanimljiv obrazac promjene brzine zdjelice pod opterećenjem. Većina ispitanika (14 od 20) pokazuje pad vrijednosti, no veličina smanjenja izrazito varira. Trojica ispitanika bilježe smanjenja koja daleko premašuju skupnu srednju vrijednost, s rasponom od -8,6 % do -16,8 %, pri čemu ispitanik s najvećim padom u uvjetima bez opterećenja ostvaruje jednu od viših vrijednosti uzorka – što upućuje na visoku osjetljivost te tehnike zaleta na fiziološko opterećenje i moguće

izrazitije oslanjanje na eksplozivnu anaerobnu snagu donjih ekstremiteta, koja je pri 30-15IFT-u izrazito opterećena.

Nasuprot tomu, šestero ispitanika ne pokazuje pad brzine zdjelice ili bilježe marginalne promjene unutar varijabilnosti mjerenja (raspon od $-0,8\%$ do $+3,6\%$). Navedeni rezultat posebno je zanimljiv s aspekta individualne adaptacije na umor: moguće je da ti igrači koriste konzervativniju, biomehanički učinkovitiju tehniku zaleta koja ne ovisi dominantno o eksplozivnoj anaerobnoj snazi, već o koordiniranom korištenju tjelesne mase i inercije – tehnika koja je pod fiziološkim opterećenjem stabilnija. Plummer i Oliver (2016) u istraživanju učinka aerobnog umora na kinematiku skok šuta naglašavaju da umor primarno utječe na kompenzacijska gibanja zdjelice i trupa, što upućuje na to da igrači s većom sposobnošću stabilizacije zdjeličnog pojasa pod opterećenjem bolje zadržavaju konzistentnost kinetičkog lanca i time brzinu zaleta.

Vrijedno je istaknuti i razliku u pristupu tehnici zaleta koja se može opisati kroz opseg rotacije zdjelice. Kod ispitanika s višim vrijednostima Pelvis_Vmax pretpostavlja se da veći opseg rotacije zdjelice doprinosi višoj vršnoj brzini, ali uz moguću povećanu nestabilnost lateralne ravnoteže. S druge strane, ispitanici koji ostvaruju niže vrijednosti brzine zdjelice, ali izrazitu stabilnost pod opterećenjem, mogli bi primjenjivati tehničko-taktički kompromis u kojemu se manji doprinos zaleta kompenzira učinkovitijim iskorištavanjem kinetičkog lanca u kasnijim fazama – osobito u fazi odraza i leta.

Kinematičke varijable: Faza odraza

U fazi odraza, u kojoj su analizirane vršne kutne brzine zglobova, skočnog zgloba, koljena i kuka (Gležanj_AVmax, Koljeno_AVmax, Kuk_AVmax), trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) te vršne linearne brzine natkoljenice i potkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax, Potk_Vmax), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja vršne linearne brzine natkoljenice (Natk_Vmax) i produljenja trajanja kontakta s podlogom (Tkont), dok Gležanj_AVmax, Koljeno_AVmax, Kuk_AVmax i Potk_Vmax nisu pokazali značajne promjene.

Faza odraza predstavlja vremenski najvažniji segment izvedbe skok šuta: upravo u tom kratkom intervalu kontakta odraznog stopala s podlogom generira se vertikalni impuls koji određuje visinu i duljinu skoka, a istovremeno se pokreće sekvencijalna aktivacija kinetičkog lanca donjih ekstremiteta prema gornjem dijelu tijela.

U ovoj fazi mjerene su sljedeće varijable: maksimalna kutna brzina u skočnom zglobov odrazne noge (Gležanj_AVmax), maksimalna kutna brzina u zglobov koljena odrazne noge (Koljeno_AVmax) i maksimalna kutna brzina u zglobov kuka odrazne noge (Kuk_AVmax), trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) te maksimalna linearna brzina natkoljenice (Natk_Vmax) i potkoljenice (Potk_Vmax) odrazne noge.

Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) mjeri se kao vremenski interval između inicijalnog kontakta stopala i trenutka odvajanja od podloge, izražen u milisekundama. Radi se o varijabli koja ne opisuje vrstu gibanja u zglobov nego vremenski okvir unutar kojeg se odvija cjelokupna mehanička akcija odraza – dakle ograničavajući čimbenik unutar kojeg moraju biti generirani svi proksimalni impulsi kinetičkog lanca. Kraće trajanje kontakta uz visoke sile odraza upućuje na veću eksplozivnost i reaktivnu snagu odrazne noge.

Prosječno trajanje kontakta u uvjetima prije opterećenja iznosi $200,4 \pm 19,4$ ms, a u uvjetima nakon opterećenja $203,8 \pm 20,6$ ms, što odgovara porastu od 1,7%. Wagner i suradnici (2011) na uzorku vrhunskih rukometaša bilježe da je trajanje kontakta karakteristično za skok šut kraće nego za ostale tehnike bacanja iz uporišta ili sa tla, što upućuje na to da skok šut pred organizam postavlja posebno visoke zahtjeve eksplozivne reaktivne snage. Thorlund i suradnici (2008) u istraživanju akutnih promjena živčano-mišićnih svojstava nakon simulirane rukometne utakmice bilježe značajno smanjenje brzine razvoja sile kvadricepsa za 16 – 21% ($p < 0,05$), što upućuje na to da produljenje trajanja kontakta pod opterećenjem nije slučajno – smanjen kapacitet eksplozivne snage rezultira dužim potrebnim vremenskim intervalom za generiranje jednakog impulsa.

Individualne razlike u varijabli Tkont unutar uzorka su izrazite: raspon vrijednosti u skupini prije opterećenja proteže se od 158,6 ms do 232,6 ms, što je raspon od gotovo 75 ms. Najkraća trajanja kontakta bilježe ispitanici čiji je odrazni mehanizam karakteriziran visokom eksplozivnom reaktivnom snagom, dok dulja trajanja odražavaju manje elastičan i reaktivan odrazni mehanizam. Nakon opterećenja većina ispitanika (12 od 20) pokazuje produljenje vrijednosti varijable Tkont-a, s rasponom od +1,8% do +9,1%, dok manjina (8 od 20) bilježi skraćanje ili zanemarivo produljenje. Ispitanici koji nakon opterećenja bilježe produljenje iznad 8% (trojica ispitanika) mogli bi biti podložniji narušavanju sekvencijalnog impulsa odraza, jer dulje trajanje kontakta smanjuje vremensku preciznost aktivacije proksimalnih segmenata kinetičkog lanca.

Maksimalna kutna brzina u skočnom zglobu opisuje brzinu kojom stopalo odrazne noge prelazi u ispružen položaj u fazi odraza (Gležanj_AVmax). Radi se o kutnom pokretu stopala, pri čemu impuls tog pokreta putuje prema potkoljenici. Vršna brzina tog pokreta dostiže se u završnom dijelu faze odraza, neposredno prije odvajanja stopala od podloge, kada su mišići odrazne noge maksimalno aktivirani.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $597,1 \pm 198,4$ °/s, a nakon opterećenja $604,1 \pm 180,2$ °/s (+1,2%). Izostanak pada na razini cijelog uzorka zanimljiv je nalaz koji upućuje na to da su plantarni fleksori odrazne noge relativno otporni na umor induciran 30-15IFT testom. Visoke vrijednosti standardne devijacije ($198 - 180$ °/s) upućuju na to da su razlike između ispitanika izrazito velike te da srednja vrijednost ne odražava dovoljno vjerno stvarne individualne obrasce.

Individualna analiza otkriva izrazito različite obrasce promjene: šestero ispitanika bilježi padove između -3,2% i -23,2%, dok drugi pokazuju poraste koji u jednom slučaju dosežu +131,8%. Ta iznimno visoka vrijednost porasta najvjerojatnije upućuje na promjenu tehničkog obrasca odraza pod opterećenjem. Ispitanik koji bilježi taj porast imao je u uvjetima bez opterećenja iznimno nisku vrijednost kutne brzine u skočnom zglobu (150 °/s), što znači da u normalnim uvjetima gotovo nije koristio pokret zgloba kao doprinos impulsu odraza. Pod opterećenjem, kada su proksimalniji segmenti donjih ekstremiteta oslabljeni umorom, skočni zglob može preuzeti veći udio u generiranju impulsa odraza kao kompenzacija za oslabljene segmente.

Maksimalna kutna brzina u zglobu koljena odrazne noge opisuje brzinu kojom se koljeno pruža u završnom dijelu odraza (Koljeno_AVmax). Pokret se odvija na sljedeći način: nakon ekscentrične faze fleksije u koljenu, natkoljenica i potkoljenica brzo se pružaju kako bi generirale vertikalni impuls potreban za odraz, pri čemu se ostvaruje visoka brzina ekstenzije u koljenu. Vršna brzina ekstenzije koljena dostiže se u završnom dijelu kontakta s podlogom, neposredno prije odvajanja stopala.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $554,8 \pm 102,0$ °/s, a nakon opterećenja $537,8 \pm 85,1$ °/s (-3,1%). Pad od 3,1% na razini cijelog uzorka upućuje na to da je kutna brzina koljena odrazne noge osjetljivija na umor od kutne brzine skočnog zgloba i kuka. Thorlund i suradnici (2008) bilježe da akutni umor nastao nakon rukometne utakmice uzrokuje značajno smanjenje brzine razvoja sile i mišićnog impulsa kvadricepsa – a upravo su ti mišići odgovorni za ekstenziju koljena, što neposredno objašnjava osjetljivost ove varijable na umor. Wagner i suradnici (2011) navode da je kutna brzina zglobova donjih ekstremiteta umjereno povezana s brzinom

lopte, što znači da pad u ovoj varijabli može imati mjerljive posljedice na konačnu brzinu šuta.

Individualni obrasci su heterogeni: pet ispitanika bilježi padove veće od 9% (raspon -12,2% do -29,3%), dok trojica pokazuju poraste između +9,1% i +20,3%. Ispitanik s padom od -29,3% ostvaruje u uvjetima bez opterećenja jednu od viših vrijednosti uzorka (763,7 °/s), što upućuje na to da igrači koji u mirnim uvjetima postižu visoke kutne brzine ekstenzije koljena mogu biti podložniji gubitku te sposobnosti pod opterećenjem – jer ona pretežno počiva na eksplozivnoj živčano-mišićnoj aktivaciji, koja je pri visokom fiziološkom opterećenju izrazito narušena.

Maksimalna kutna brzina u zglobu kuka odrazne noge opisuje brzinu kojom natkoljenica prelazi prema naprijed i gore u fazi odraza (Kuk_AVmax). Pokret je kratak, ali eksplozivan i doprinosi visini skoka te pomicanju tijela prema cilju. Vršna brzina kuka nastupa ranije od vršnih brzina koljena i gležnja – što je u skladu s načelom prema kojemu proksimalniji zglobovi dostižu svoju vršnu aktivnost ranije od distalnih (Serrien i Baeyens, 2018).

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $515,5 \pm 166,8$ °/s, a nakon opterećenja $521,4 \pm 174,6$ °/s (+1,1%). Izostanak pada i blagi porast na razini cijelog uzorka mogu se objasniti činjenicom da mišići zaduženi za ekstenziju kuka sudjeluju u manjoj mjeri u specifičnom opterećenju koje nameće 30-15IFT protokol te mogućom kompenzacijom – pod opterećenjem dolazi do povećanog angažmana kuka kako bi se nadoknadio pad eksplozivnosti zglobova koji se aktiviraju kasnije u kinetičkom lancu, što je u skladu s opisanim kompenzacijskim mehanizmima (Plummer i Oliver, 2016).

Raspon vrijednosti između ispitanika iznimno je velik: od 348,8 °/s do 840,4 °/s u uvjetima prije opterećenja – razlika od gotovo 500 °/s unutar istog uzorka. To jasno pokazuje da ispitanici primjenjuju tehničke pristupe odrazu koji se međusobno znatno razlikuju: dio igrača koristi snažan i brz pokret u kuku, dok drugi primjenjuju sporiji i kontroliraniji obrazac. Najizraženiji individualni porast nakon opterećenja (+35,0%) zabilježen je kod ispitanika koji u uvjetima prije opterećenja ostvaruje srednje vrijednosti (545,83 °/s), a nakon opterećenja dostiže 736,7 °/s – jedan od viših rezultata u uzorku. Navedeni nalaz upućuje na to da je taj ispitanik pod opterećenjem pojačao angažman proksimalne muskulature donjih ekstremiteta, osobito ekstenzora kuka (gluteus maximus i mišići stražnje lože), kao kompenzaciju za slabljenje zglobova koji se aktiviraju kasnije u kinetičkom lancu.

Maksimalna linearna brzina natkoljenice odrazne noge (m/s) opisuje ukupnu brzinu kojom se natkoljenica odrazne noge kreće kroz prostor u fazi odraza – prema gore i prema naprijed (Natk_Vmax). Vršna brzina natkoljenice dostiže se nakon vršne brzine kuka, ali prije vršne brzine potkoljenice, što je u skladu s načelom sekvencijalne aktivacije od proksimalnih prema distalnim segmentima.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $5,0 \pm 0,7$ m/s, a nakon opterećenja $4,7 \pm 0,6$ m/s (-6,4%). Taj pad od 6,4% najveći je na skupnoj razini u fazi odraza, a istovremeno je i najdosljedniji negativni trend u ovoj fazi – 16 od 20 ispitanika bilježi pad. Navedeni nalaz je biomehanički važan jer brzina natkoljenice odrazne noge doprinosi ukupnoj snazi odraza i prijenosu impulsa prema trupu i šuterskoj ruci. Serrien i Baeyens (2018) potvrđuju da segmenti donjih ekstremiteta dostižu svoje vršne brzine redom – od kuka prema gležnju – pa pad brzine natkoljenice može poremetiti vremensku usklađenost cijelog kinetičkog lanca.

Kod pet je ispitanika pad vrijednosti veći od 8% (raspon -8,0% do -31,1%), dok dvojica bilježe porast (+5,4% i +13,2%). Ističe se ispitanik s padom od -31,1%: u uvjetima bez opterećenja ostvaruje jednu od viših vrijednosti uzorka (5,7 m/s), a pod opterećenjem pada na 3,9 m/s – razinu koja odgovara ispitanicima s najnižim vrijednostima u uzorku. Navedeni izrazit pad upućuje na to da tehnika odraza tog ispitanika u mirnim uvjetima znatno počiva na eksplozivnoj snazi, koja je pod visokim fiziološkim opterećenjem znatno smanjena.

Maksimalna linearna brzina potkoljenice odrazne noge (m/s) opisuje ukupnu brzinu kojom se potkoljenica odrazne noge kreće kroz prostor (Potk_Vmax). Potkoljenica je distalniji segment od natkoljenice, pa njezina vršna brzina nastupa nešto kasnije – u skladu s načelom sekvencijalne aktivacije od proksimalnih prema distalnim segmentima. U fazi odraza potkoljenica u početku zaostaje za natkoljenicom, a tek kada se impuls prenese na potkoljenicu, ona ubrzava i dostiže svoju vršnu brzinu. Na taj način vršna brzina potkoljenice posredno govori o učinkovitosti prijenosa energije iz proksimalnih segmenata odrazne noge prema distalnim.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $6,7 \pm 1,2$ m/s, a nakon opterećenja $6,8 \pm 1,1$ m/s (+1,7%). Kao i kod gležnja i kuka, nema smanjenja vrijednosti na skupnoj razini, što je donekle iznenađujuće s obzirom na izraženiji pad brzine natkoljenice (-6,4%). Navedenu pojavu može objasniti kompenzacijski mehanizam: kada natkoljenica usporava pod opterećenjem, povećana fleksija u koljenom zglobov može pojačati brzinu potkoljenice i nadoknaditi dio izgubljene brzine.

Individualni obrasci najheterogeniji su od svih varijabli faze odraza: raspon promjena ide od -13,8% do +38,5%. Ispitanik s porastom od +38,5% ostvaruje prije opterećenja nisku vrijednost (5,59 m/s), a nakon opterećenja dostiže 7,7 m/s – jednu od viših vrijednosti uzorka – što jasno upućuje na to da je taj ispitanik pod opterećenjem značajno promijenio mehaniku odrazne noge i pojačao oslanjanje na pokret potkoljenice.

Faza odraza pokazuje selektivni profil osjetljivosti na umor: brzina natkoljenice (-6,4%) i kutna brzina koljena (-3,1%) odrazne noge konzistentno padaju, dok su skočni zglobovi, kuk i potkoljenica odrazne noge otporni ili kompenzacijski rastu. Navedeni obrazac upućuje na to da su proksimalni mišići odrazne noge – kvadricepsi i fleksori kuka – primarna žrtva umora induciranog 30-15IFT-om, dok distalniji segmenti djelomično kompenziraju, što je u skladu s nalazima Thorlunda i suradnika (2008) o padu brzine razvoja sile kvadricepsa te s kompenzacijskim mehanizmima koje opisuju Plummer i Oliver (2016).

Kinematičke varijable: Faza leta i izbačaja lopte

U fazi leta i izbačaja lopte, u kojoj su analizirane vršne kutne brzine zglobova ramenog, lakatnog i ručnog zgloba (Rame_AVmax, Lakat_AVmax, Ručni_AVmax), vršne linearne brzine segmenata šuterske ruke (Rame_Vmax, Nadl_Vmax, Podl_Vmax, Šaka_Vmax) te prostorne i kutne varijable donjih ekstremiteta i šuterske ruke (Kolj_Amax, Kuk_Amax, Natk_VISmax, Šaka_VIS, Visina skoka, Duljina skoka), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja vršnih kutnih brzina ramena i ručnog zgloba (Rame_AVmax, Ručni_AVmax), vršnih linearnih brzina ramena i šake (Rame_Vmax, Šaka_Vmax) te maksimalne visine šake i visine skoka (Šaka_VIS, Visina skoka), dok Lakat_AVmax, Nadl_Vmax, Podl_Vmax, Kolj_Amax, Kuk_Amax, Natk_VISmax i Duljina skoka nisu pokazali značajne promjene.

Faza leta i izbačaja lopte najsloženija je faza skok šuta u rukometu. U toj fazi igrač se nalazi u zraku, bez kontakta s podlogom, a sekvencijalna aktivacija segmenata šuterske ruke određuje konačnu brzinu i preciznost lopte.

Pad vršnih linearnih brzina ramena i šake te smanjenje maksimalne visine šake i visine skoka ukazuju na to da umor narušava učinkovitost proksimalno-distalnog prijenosa brzine duž kinematičkog lanca, što se u konačnici odražava u nižoj brzini lopte. Takav obrazac u skladu je s biomehaničkim modelima skok šuta, prema kojima su visina izbačaja i brzina lopte ključni izvedbeni pokazatelji ove faze pokreta.

Kutne brzine segmenata šuterske ruke

U skupini kutnih brzina segmenata šuterske ruke, u kojoj su analizirane maksimalne kutne brzine ramenog, lakatnog i ručnog zgloba (Rame_AVmax, Lakat_AVmax, Ručni_AVmax), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja maksimalne kutne brzine ramena i ručnog zgloba (Rame_AVmax, Ručni_AVmax), dok u zglobu lakta (Lakat_AVmax) nisu utvrđene značajne promjene.

Maksimalna kutna brzina u zglobu ramena šuterske ruke opisuje brzinu unutarnje rotacije nadlaktice – pokreta pri kojemu se nadlaktica brzo okreće prema unutra oko svoje uzdužne osi u trenutku izbačaja lopte (Rame_AVmax). To je jedan od najbržih rotacijskih pokreta u ljudskom tijelu i ključna karika koja prenosi energiju iz trupa prema laktu i šaci. Vršna kutna brzina ramena dostiže se u trenutku izbačaja lopte ili neposredno nakon njega, što je u skladu s nalazima van den Tillaara i Etteme (2007) prema kojima igrači koji dostižu vršnu unutarnju rotaciju ramena neposredno nakon izbačaja postižu značajno višu brzinu lopte od onih koji je dostižu prije izbačaja.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $1377,3 \pm 443,7$ °/s, a nakon opterećenja $1157,0 \pm 371,0$ °/s (-16,0 %). Navedeni pad najveći je od svih mjerenih kutnih brzina šuterske ruke i biomehanički je posebno važan jer unutarnja rotacija ramena prema nalazima van den Tillaara i Etteme (2007) zajedno s ekstenzijom lakta objašnjava čak 73 % varijance brzine lopte. Wagner i suradnici (2010) potvrđuju da je kutna brzina unutarnje rotacije ramena pri izbačaju jedna od dviju varijabli s najvišim korelacijama s brzinom lopte u vrhunskih rukometaša. Plummer i Oliver (2016) u istraživanju učinka lokaliziranog umora gornjeg ekstremiteta na kinematiku skok šuta navode da kutna brzina ramena ne pokazuje statistički značajne promjene, što je u suprotnosti s nalazima dobivenim u ovom istraživanju. Navedena razlika može se pripisati različitim vrstama induciranog umora: lokalizirani umor gornjeg ekstremiteta ne narušava živčano-mišićnu kontrolu ramena, dok generalizirani metabolički umor induciran 30-15IFT protokolom zahvaća cjelokupni živčano-mišićni sustav i time mijenja obrasce aktivacije proksimalnih segmenata šuterske ruke.

Individualni obrasci su izrazito heterogeni: deset ispitanika bilježi padove s rasponom od -6,6 % do -51,1 %, dok šestero ispitanika bilježi poraste između +3,2 % i +93,0 %. Ispitanik s najvećim padom (-51,1 %) u uvjetima prije opterećenja ostvaruje

jednu od najviših vrijednosti uzorka ($2166,3 \text{ }^\circ/\text{s}$) i pod opterećenjem pada na $1058,7 \text{ }^\circ/\text{s}$ – vrijednost koja je ispod skupne srednje vrijednosti uzorka u uvjetima bez opterećenja. Navedeni izrazit pad upućuje na to da je tehnika šuta tog ispitanika u mirnim uvjetima uvelike ovisna o eksplozivnoj aktivaciji unutarnje rotacije ramena, koja je pod visokim metaboličkim opterećenjem znatno narušena. S druge strane, ispitanik s porastom od $+93,0\%$ u uvjetima prije opterećenja ostvaruje jednu od nižih vrijednosti uzorka ($787,5 \text{ }^\circ/\text{s}$), a pod opterećenjem dostiže $1520,2 \text{ }^\circ/\text{s}$. Takav porast vjerojatno odražava adaptivnu promjenu tehnike izvedbe šuta, a ne stvarno poboljšanje funkcionalne učinkovitosti ramenog zgloba pod opterećenjem.

Maksimalna kutna brzina u zglobu lakta šuterske ruke opisuje brzinu ispužanja podlaktice u kretanju prema naprijed – pokreta pri kojemu podlaktica brzo prelazi u ekstenzirani položaj (Lakat_AVmax). Primarni mišić koji izvodi taj pokret jest triceps brachii. Ovaj pokret odvija se neposredno prije unutarnje rotacije ramena i dostiže svoju vršnu brzinu malo ranije – što je u skladu s proksimalno–distalnim slijedom aktivacije, prema kojemu rameni zglob dostiže svoju vršnu brzinu prije lakta. Serrien i Baeyens (2018) u sustavnom preglednom radu i meta-analizi potvrđuju da u skok šutu vršna kutna brzina ekstenzije lakta nastupa ranije od vršne kutne brzine unutarnje rotacije ramena, pri čemu cjelokupna sekvenca vršnih kutnih brzina slijedi obrazac od zdjelice i trupa prema distalnim segmentima ruke.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $1115,2 \pm 305,2 \text{ }^\circ/\text{s}$, a nakon opterećenja $1139,2 \pm 338,4 \text{ }^\circ/\text{s}$ ($+2,2 \%$). Izostanak pada i blagi porast na skupnoj razini upućuju na to da je lakat relativno otporan na umor induciran 30-15IFT protokolom. Jedan mogući razlog jest taj da je ekstenzija lakta – za razliku od unutarnje rotacije ramena koja se oslanja na manje mišiće visoke eksplozivnosti – podržana snažnim tricepsom brachii koji je relativno otporan na umor. Plummer i Oliver (2016) u istraživanju lokaliziranog umora gornjeg ekstremiteta navode da lakat ne pokazuje statistički značajne kinematičke promjene nakon protokola opterećenja, što je u skladu s relativnom otpornošću lakta zabilježenom i u ovom istraživanju.

Individualni obrasci potvrđuju heterogenost: oko polovice ispitanika bilježi pad (raspon $-5,8 \%$ – $-20,0 \%$), dok drugi pokazuju porast do $+26,9 \%$. Navedena raznolikost upućuje na to da lakat u uvjetima opterećenja kod pojedinih igrača kompenzira gubitke u drugim segmentima – povećanjem vlastite aktivnosti kako bi nadoknadio smanjen doprinos ramena.

Maksimalna kutna brzina u ručnom zglobu šuterske ruke opisuje brzinu palmarne fleksije ručnog zgloba – završnog pokreta šuterske ruke kojim se lopti daje finalni impuls i rotacija neposredno pred trenutak izbačaja (Ručni_AVmax). To je najdistalniji pokret u kinetičkom lancu gornjeg ekstremiteta: šaka se iz ispruženog položaja brzo pregiba prema naprijed, čime se povećava ukupna brzina šake i igraču omogućuje kontrola smjera i rotacije lopte. Vršna brzina ručnog zgloba dostiže se posljednja u proksimalno-distalnom slijedu – nakon ramena i lakta – i predstavlja finalni korak prijenosa energije prema lopti. Šibila i suradnici (2003) naglašavaju da fleksori šake slabijih igrača u znatno manjoj mjeri doprinose ukupnoj brzini šake od onih boljih igrača, što upućuje na to da je aktivnost palmarnih fleksora povezana s kvalitetom izvedbe.

Prosječna vrijednost izmjerena prije opterećenja iznosi $735,5 \pm 265,2$ °/s, a nakon opterećenja $651,6 \pm 253,3$ °/s (-11,4 %). To je drugi po veličini pad kutnih brzina šuterske ruke u fazi leta i izbačaja. Visoka standardna devijacija upućuje na veliku heterogenost između ispitanika, što je relevantno jer kutna brzina ručnog zgloba odražava individualne razlike u tehnici završnog pokreta šuta.

Individualni obrasci najheterogeniji su od svih varijabli kinetičkog lanca gornjeg ekstremiteta: padovi se kreću od -0,6 % do -62,0 %, dok porasti dosežu do +190,0 %. Ispitanik s porastom od +190,0 % u uvjetima prije opterećenja ima iznimno nisku vrijednost (208,7 °/s) – što upućuje na to da u mirnim uvjetima gotovo uopće ne koristi aktivni pokret ručnog zgloba pri izbačaju – a pod opterećenjem ta vrijednost raste na 605,2 °/s. Navedeni nalaz upućuje na to da je kod tog ispitanika umor potaknuo pokret ručnog zgloba kao kompenzacijsku strategiju za gubitke u proksimalnijim segmentima. Nasuprot tomu, ispitanik s padom od -62,0 % u mirnim uvjetima koristi snažan pokret ručnog zgloba (895,1 °/s) koji se pod opterećenjem smanjuje na 340,2 °/s – gubitak koji je biomehanički posebno nepovoljan jer se radi o posljednjem segmentu koji doprinosi brzini lopte.

Linearne brzine segmenata šuterske ruke

U skupini linearnih brzina segmenata šuterske ruke, u kojoj su analizirane vršne linearne brzine ramena, nadlaktice, podlaktice i šake (Rame_Vmax, Nadl_Vmax, Podl_Vmax, Šaka_Vmax), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja vršnih brzina ramena i šake (Rame_Vmax, Šaka_Vmax), dok nadlaktica i podlaktica (Nadl_Vmax, Podl_Vmax) nisu pokazale značajne promjene.

Linearne brzine pojedinih segmenata šuterske ruke opisuju ukupnu brzinu kretanja svakog segmenta u prostoru. One prikazuju jedno od temeljnih načela biomehanike bacanja: brzina se postupno povećava od ramena prema šaci, pri čemu svaki sljedeći segment u lancu – nadlaktica, podlaktica, šaka – dostiže veću brzinu od prethodnoga.

Prosječna brzina ramena iznosila je prije opterećenja $4,9 \pm 0,6$ m/s, a nakon opterećenja $4,8 \pm 0,7$ m/s (-3,7 %). Brzina nadlaktice iznosila je $6,3 \pm 0,6$ m/s prije i $6,2 \pm 0,6$ m/s nakon opterećenja (-1,1 %). Brzina podlaktice iznosila je $11,4 \pm 1,1$ m/s prije i $11,3 \pm 1,0$ m/s nakon opterećenja (-1,5 %). Brzina šake – kao posljednjeg i najbržeg segmenta kinetičkog lanca – iznosila je $12,6 \pm 1,1$ m/s prije i $12,2 \pm 0,9$ m/s nakon opterećenja (-3,1 %).

Progresivno povećanje brzine od ramenog zgloba (oko 5 m/s) prema šaci (oko 12–13 m/s) potvrđuje djelovanje proksimalno-distalnog mehanizma sumacije brzina u oba uvjeta mjerenja, što je u skladu s modelom koji opisuju Wagner i suradnici (2011) te Serrien i Baeyens (2018). Pad brzine šake od 3,1 % biomehanički je relevantan jer je brzina šake neposredno povezana s brzinom lopte pri izbačaju – Belčić i suradnici (2021) bilježe statistički značajan pad brzine šake pod opterećenjem ($F = 4,01$; $p = 0,04$) koji je praćen padom brzine lopte ($F = 5,42$; $p = 0,02$). Individualna analiza brzine šake otkriva da osam ispitanika bilježi padove veće od 3 %, s rasponom od -4,0 % do -14,0 %, dok šestoro ispitanika bilježi zanemariv pad ili blagi porast – što odražava individualne razlike u osjetljivosti finalnog segmenta kinetičkog lanca na umor.

Unutarnja rotacija ramena (-16,0 %) i pokret ručnog zgloba (-11,4 %) najosjetljiviji su na umor od svih varijabli kinetičkog lanca gornjeg ekstremiteta – što je posebno nepovoljan nalaz jer su to upravo dvije varijable s najvećim utjecajem na brzinu lopte prema van den Tillaaru i Ettemi (2007). Lakat se pokazuje relativno otpornim, što je u skladu s nalazima Plummer i Oliver (2016).

Visina šake, visina i duljina skoka

U skupini prostorno-visinskih varijabli, u kojoj su analizirane visina šake šuterske ruke u trenutku izbačaja, visina skoka i duljina skoka (Šaka_VIS, Visina skoka, Duljina skoka), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja visine šake pri izbačaju i ukupne visine skoka (Šaka_VIS, Visina skoka), dok duljina skoka nije pokazala značajne promjene.

Visina šake šuterske ruke u trenutku izbačaja opisuje vertikalnu udaljenost šake od podloge pri odvajanju lopte od šake (Šaka_VIS). Viša pozicija šake pri izbačaju znači veći efektivni kut prema голу, otežava reakciju vratara i povećava mogućnost preciznog šuta. Navedena varijabla kombinira visinu skoka i vertikalnu poziciju segmenata gornjeg ekstremiteta u trenutku izbačaja.

Prosječna vrijednost izmjerena je prije opterećenja $251,5 \pm 12,0$ cm, a nakon opterećenja $247,8 \pm 12,0$ cm (-1,5 %). Pad od 1,5 % relativno je mali, ali konzistentan – šaka u trenutku izbačaja niža je prosječno za oko 3,7 cm pod opterećenjem. Šibila i suradnici (2003) naglašavaju važnost kinematičkih parametara izbačaja, pri čemu visina izbačaja predstavlja jedan od relevantnih čimbenika tehničke učinkovitosti šuta. Wagner i suradnici (2010) pokazuju da viši igrači ostvaruju višu točku izbačaja, što biomehanički povećava kut šuta.

Prosječna visina skoka iznosi $37,5 \pm 6,0$ cm prije opterećenja i $36,3 \pm 6,8$ cm nakon opterećenja (-3,2 %). Duljina skoka ostaje gotovo identična: $238,2 \pm 33,7$ cm prije i $238,4 \pm 31,3$ cm nakon opterećenja (+0,1 %). Pad visine skoka od 3,2 % uz očuvanje duljine skoka upućuje na selektivno smanjenje vertikalne komponente skoka pod opterećenjem – što je u skladu s nalazima Thorlunda i suradnika (2008), koji bilježe pad visine vertikalnog skoka od 5,2 % ($p < 0,01$) nakon simulirane rukometne utakmice. Individualno, šestero ispitanika bilježi padove visine skoka veće od 5%, dok trojica bilježe porast – što odražava individualne razlike u otpornosti eksplozivne snage odrazne noge na umor.

Kutovi zamašne noge

Maksimalni kut u zglobu kuka (Kuk_Amax) ($64,3 \pm 13,1^\circ$ prije i $64,7 \pm 12,7^\circ$ nakon opterećenja, +0,6 %) i maksimalni kut u zglobu koljena zamašne noge (Kolj_Amax) ($121,8 \pm 9,0^\circ$ prije i $121,5 \pm 10,6^\circ$ nakon opterećenja, -0,3 %) pokazuju gotovo zanemarive promjene na skupnoj razini. Ti kutovi opisuju opseg pokreta zamašne noge u fazi leta – koliki je postignuti kut u zglobu kuka te koliki je stupanj fleksije u zglobu koljena pri maksimalnom zamahu. Gotovo nepromijenjeni kutovi kuka i koljena pod opterećenjem upućuju na to da umor ne narušava prostornu organizaciju tijela u fazi leta – ispitanici zadržavaju sličan položaj tijela pri skok šutu u oba uvjeta mjerenja, a ono što se mijenja su brzine kojima se segmenti kreću, a ne položaji koje zauzimaju.

Završna faza

U završnoj fazi skok šuta, u kojoj su kao ključni izvedbeni pokazatelji analizirane maksimalna brzina lopte nakon izbačaja i preciznost šuta (Lopta_Vmax, PREC), fiziološko opterećenje dovelo je do statistički značajnog smanjenja brzine lopte (Lopta_Vmax) uz vrlo velik učinak te granično značajnog poboljšanja preciznosti šuta (PREC), pri čemu su šutovi nakon opterećenja prosječno odstupali manje od ciljane točke.

Završna faza skok šuta obuhvaća dva ishoda koji izravno određuju situacijsku učinkovitost igrača u natjecanju: brzinu lopte nakon izbačaja (km/h) i preciznost šuta (cm – odstupanje lopte od centra cilja). Te dvije varijable predstavljaju krajnji rezultat cjelokupnog kinetičkog lanca opisanog u prethodnim fazama – zbrajaju se svi impulsi generirani u zaletu, odrazu i letu te se manifestiraju kao brzina i točnost lopte u trenutku dolaska do cilja.

Brzina lopte mjeri se kao maksimalna brzina lopte neposredno nakon odvajanja od šake igrača, izražena u kilometrima na sat (Lopta_Vmax). Radi se o najprimjenjivijem pokazatelju ukupne izvedbene kvalitete skok šuta jer izravno odražava učinkovitost prijenosa kinetičke energije kroz cijeli kinetički lanac – od impulsa zaleta, preko odraza i zamaha, do sekvencijalne aktivacije šuterske ruke. Van den Tillaar i Ettema (2004, 2007) pokazali su da brzina lopte u rukometu u najvećoj mjeri ovisi o unutarnjoj rotaciji ramena i ekstenziji lakta, pri čemu kombinacija tih dvaju pokreta objašnjava velik dio varijance brzine šuta. Wagner i suradnici (2011) dodatno potvrđuju snažnu povezanost maksimalnih kutnih brzina zdjelice i trupa s brzinom lopte, što naglašava važnost prijenosa energije od donjeg dijela tijela prema šuterskoj ruci. Prosječna brzina lopte izmjerena prije opterećenja iznosila je $89,5 \pm 7,0$ km/h, a nakon opterećenja $86,3 \pm 6,9$ km/h – što odgovara padu od 3,1 % ili prosječno 2,8 km/h. Navedeni pad statistički je i praktično relevantan: Belčić i suradnici (2021) bilježe statistički značajan pad brzine lopte pod visokim laktatnim opterećenjem ($F = 5,42$; $p = 0,02$), pri čemu pad od oko 3 – 4 % odgovara razlici opipljivoj u natjecanju jer produžuje reakcijsko vrijeme vratara za svega nekoliko milisekundi – ali u vrhunskom rukometu i to može biti presudno. Nuño i suradnici (2016) u istraživanju učinka fiziološkog umora na bacanje u rukometu bilježe statistički značajan pad brzine lopte koji nastupa već u prvoj fazi protokola opterećenja, što pokazuje da su čak i umjerene razine fiziološkog opterećenja dovoljne za mjerljivi gubitak brzine lopte. Plummer i sur.

(2016) pokazali su da rukometaši koji šutiraju s nižim percipiranim naporom postižu statistički značajno nižu brzinu lopte, što potvrđuje da je maksimalni voljni napor preduvjet za postizanje vršnih kinematičkih vrijednosti – nalaz koji je u skladu s padom brzine lopte zabilježenim u ovom istraživanju u uvjetima visokog fiziološkog opterećenja.

Individualna analiza pokazuje da pad brzine lopte nije ravnomjeran: 17 od 20 ispitanika bilježi pad, s rasponom od -0,3 % do -14,6 %, dok trojica bilježe zanemariv pad ili stabilnost. Ispitanik s padom od -14,6 % u uvjetima prije opterećenja ostvaruje jednu od viših vrijednosti uzorka (94,5 km/h) i pod opterećenjem pada na 80,7 km/h – razliku od gotovo 14 km/h koja odgovara čitavoj kategoriji brzinskog profila šutova. Navedeni nalaz upućuje na to da ispitanici koji u mirnim uvjetima postižu visoke brzine lopte zahvaljujući eksplozivnoj aktivaciji kinetičkog lanca mogu biti podložniji većem padu pod opterećenjem, jer je njihova tehnika uvelike ovisna o živčano-mišićnim mehanizmima koji su pri visokom metaboličkom opterećenju znatno narušeni. S druge strane, trojica ispitanika koji zadržavaju brzinu lopte pod opterećenjem mogu primjenjivati tehničku strategiju koja u manjoj mjeri ovisi o eksplozivnoj snazi, a više o koordiniranoj aktivaciji kinetičkog lanca – što se pokazuje kao otpornija strategija u uvjetima opterećenja.

Preciznost šuta mjeri se kao udaljenost mjesta pogotka lopte od centra cilja, izražena u centimetrima – pri čemu manja vrijednost znači veću preciznost, odnosno bliže pogađanje centra cilja (PREC). Negativne vrijednosti u pojedinim mjerenjima odražavaju precizne šutove na suprotnoj strani cilja od koje je igrač ciljao. Preciznost je uz brzinu lopte temeljni pokazatelj situacijske učinkovitosti šuta i ovisi o nizu biomehaničkih čimbenika, osobito o stabilnoj poziciji šake u trenutku odvajanja lopte te kontroliranoj aktivaciji ručnog zgloba.

Prosječna preciznost izmjerena prije opterećenja iznosila je $41,3 \pm 31,3$ cm, a nakon opterećenja $33,9 \pm 27,5$ cm. Smanjenje odstupanja od centra cilja od 17,8 % znači da su ispitanici pod opterećenjem – paradoksalno – preciznije pogađali cilj. Navedeni nalaz na skupnoj razini naizgled je neočekivan, no može se objasniti kompenzacijskim smanjenjem brzine lopte: ispitanici koji pod opterećenjem šutiraju sporije instinktivno više pažnje posvećuju preciznosti jer im je manje energije dostupno za maksimalni napor. Taj fenomen poznat je u biomehanici bacanja kao kompromisni odnos između brzine i preciznosti – pri nižim brzinama preciznost tipično raste. Navedeni mehanizam potvrđuju Nuño i suradnici (2016): u njihovu istraživanju

preciznost šuta statistički značajno pada tek na kraju protokola opterećenja, dok brzina lopte pada ranije – što upućuje na to da organizam u prvim fazama opterećenja žrtvuje brzinu kako bi sačuvao preciznost.

Standardna devijacija je iznimno visoka u obje skupine (31 – 27 cm), što upućuje na veliku heterogenost između ispitanika. Individualna analiza otkriva izrazito heterogene obrasce: deset ispitanika bilježi smanjenje odstupanja od centra (poboljšanje preciznosti) s rasponom od -3,7 % do -67,8 %, dok osam ispitanika bilježi pogoršanje preciznosti s rasponom od +1,6 % do +177,5 %. Ispitanik s porastom odstupanja od +177,5 % u uvjetima prije opterećenja pogađa relativno blizu centra (20,2 cm), a pod opterećenjem promašuje za prosječno 56,1 cm – što znači da je preciznost tog ispitanika izrazito osjetljiva na umor. Nasuprot tome, ispitanik s poboljšanjem od -67,8 % u mirnim uvjetima ostvaruje visoko odstupanje (51,3 cm) koje se pod opterećenjem smanjuje na 16,5 cm. Ta iznimna interindividualna varijabilnost preciznosti upućuje na to da su individualne strategije šutiranja pod opterećenjem znatno heterogenije od kinematičkih promjena te da skupna srednja vrijednost preciznosti ne opisuje adekvatno stvarne izvedbene obrasce na razini pojedinih ispitanika.

Navedena ograničenja u interpretaciji preciznosti šuta sukladna su s općom neujednačenošću nalaza u literaturi – različitost protokola opterećenja, veličina uzoraka i metodologije mjerenja preciznosti onemogućuju jednoznačnu generalizaciju dobivenih rezultata na populaciju rukometaša. Stoga nalaze o preciznosti valja tumačiti kao opisni uvid specifičan za uzorak ovog istraživanja, a ne kao opću zakonitost.

Brzina lopte pada za 3,1 %, što je u skladu s nalazima Belčića i suradnika (2021) i Nuña i suradnika (2016) – pad je dosljedan kod 17 od 20 ispitanika, a ispitanik s najvećim padom bilježi smanjenje od 14 km/h.

Preciznost šuta pokazuje paradoksalan nalaz – na skupnoj razini poboljšava se (smanjuje se odstupanje od centra cilja), što se objašnjava klasičnim kompromisnim odnosom između brzine i preciznosti bacačkog gibanja: ispitanici koji pod opterećenjem šutiraju sporije instinktivno više pažnje posvećuju preciznom ciljanju. Navedeni mehanizam potvrđuju Nuño i suradnici (2016). Individualna varijabilnost preciznosti iznimno je visoka (raspon od -67,8 % do +177,5 %), što skupnu srednju vrijednost čini nedovoljno reprezentativnom za opis stvarnih izvedbenih obrazaca.

Prethodne analize obuhvatile su kinematičke promjene skok šuta pod utjecajem visokog fiziološkog opterećenja kroz sve strukturalne faze gibanja. U fazi zaleta

utvrđen je pad maksimalne brzine zdjelice od 3,3 %, uz izrazite interindividualne razlike u osjetljivosti na umor. Faza odraza obilježena je produljenim kontaktom s podlogom (+1,7 %), padom kutne brzine koljena (-3,1 %) i izrazitim padom translacijske brzine natkoljenice (-6,4 %) – koji je ujedno i najdosljedniji kinematički pokazatelj smanjene sposobnosti odrazne noge pod opterećenjem. U fazi leta i izbačaja opisano je selektivno slabljenje ramenog kompleksa (pad kutne brzine ramena -16,0% i kutne brzine ručnog zgloba -11,4%), pri čemu je pad brzine ramena djelomično uvjetovan smanjenjem brzine fleksije i rotacije trupa, dok su kutne brzine lakta i podlaktice ostale relativno stabilne, upućujući na kompenzacijske mehanizme unutar kinetičkog lanca. Završna faza pokazala je statistički i praktično relevantan pad brzine lopte (-3,1 %) uz paradoksalno poboljšanje skupne mjere preciznosti (-17,8 % odstupanja od centra cilja).

Svaki od tih nalaza opisuje promjene unutar jednog funkcionalnog segmenta skok šuta. Ključno pitanje koje proizlazi iz navedenih nalaza odnosi se na to je li opterećenje narušilo temeljni mehanizam prijenosa kinetičke energije duž kinetičkog lanca – od zdjelice prema šaci. Taj mehanizam opisan je u literaturi kao proksimalno-distalni redoslijed aktivacije segmenata kinetičkog lanca te predstavlja jedan od najdosljednijih i biomehanički najistraženijih koordinacijskih principa u bacačkim sportovima. U sustavnom preglednom radu i meta-analizi na temelju četrnaest istraživanja potvrđeno je da proksimalno–distalni redoslijed zglobnih rotacija u iskusnih rukometaša ostaje relativno nepromjenjiva koordinacijska topologija bacačke tehnike (Serrien i Baeyens, 2018). Analiza vremenskog slijeda aktivacije segmenata kinetičkog lanca provedena je s ciljem utvrđivanja je li ta koordinacijska topologija ostala očuvana u uvjetima visoke metaboličke zahtjevnosti ili je opterećenje, unatoč segmentarnim smanjenjima brzina, dezorganiziralo temeljni redoslijed aktivacije.

Taj obrazac podrazumijeva uzastopno uključivanje pojedinih dijelova tijela u gibanje – od najproksimalnijih (zdjelčnih) prema najdistalnijim (šaka) – uz prijenos energije od proksimalnih prema distalnim segmentima kinetičkog lanca (Šibila i sur., 2003). Posljedica tog mehanizma jest progresivno povećanje linearnih brzina distalnih krajeva segmenata prema periferiji kinetičkog lanca, pri čemu svaki distalniji segment dostiže svoju vršnu linearnu brzinu kasnije i na višoj razini od prethodnog, što u konačnici rezultira maksimalnom linearnom brzinom šake i lopte u trenutku izbačaja. Van den Tillaar i Ettema (2007) u trodimenzionalnoj analizi bacačke tehnike vrhunskih rukometaša utvrdili su da bolji bacači ranije iniciraju rotaciju zdjelice, što osigurava

bolje vremensko uokvirivanje prijenosa kinetičke energije prema distalnom dijelu kinetičkog lanca.

U ovome istraživanju proksimalno-distalni redoslijed aktivacije procjenjivan je putem vremenskih razmaka između postizanja maksimalnih linearnih brzina susjednih segmenata kinetičkog lanca – natkoljenice, ramena, nadlaktice, podlaktice i šake – zasebno u uvjetima prije i nakon opterećenja. Sve vrijednosti izražene su u milisekundama (ms), pri čemu pozitivne vrijednosti (+) potvrđuju ispravan proksimalno-distalni slijed (proksimalniji segment postiže maksimalnu brzinu prije distalnijeg).

Rezultati su pokazali da je ispravan proksimalno-distalni redoslijed bio očuvan u oba uvjeta. Vremenski razmak između natkoljenice i ramena iznosio je $+209,9 \pm 140,7$ ms prije opterećenja, a $+224,4 \pm 123,1$ ms nakon opterećenja ($\Delta = +14,5$ ms). Razmak između ramena i nadlaktice bio je $+19,6 \pm 68,3$ ms prije opterećenja, a $+31,1 \pm 77,5$ ms nakon opterećenja ($\Delta = +11,5$ ms). Razmak između nadlaktice i podlaktice iznosio je $+9,7 \pm 19,4$ ms prije i $+8,6 \pm 13,8$ ms nakon opterećenja ($\Delta = -1,1$ ms), što je praktički nepromijenjeno. Vremenski razmak između podlaktice i šake bio je $+21,8 \pm 22,8$ ms prije i $+24,0 \pm 19,9$ ms nakon opterećenja ($\Delta = +2,2$ ms). Ukupni raspon kinetičkog lanca – od natkoljenice do šake – iznosio je $+278,7$ ms prije opterećenja i $+286,0$ ms nakon opterećenja, što odgovara zanemarivoj razlici od $+7,3$ ms.

Pozitivne vrijednosti svih mjera u oba uvjeta nedvosmisleno potvrđuju da je proksimalno-distalni redoslijed aktivacije bio sukladan biomehanički poželjnom obrascu opisanom u literaturi (Serrien i Baeyens, 2018; Wagner i sur., 2010). Vrhunski rukometaši u ovome istraživanju, čak i u uvjetu visoke metaboličke zahtjevnosti (prosječna koncentracija laktata $12,2 \pm 3,1$ mmol/L, subjektivni osjećaj umora $8,4 \pm 1,0$ na CR-10 skali), nisu narušili temeljni redoslijed prijenosa kinetičke energije duž lanca, što je konzistentno s nalazima Serrienove meta-analize, prema kojoj proksimalno-distalni slijed u iskusnih igrača čini relativno nepromjenjivu koordinacijsku topologiju bacačke tehnike (Serrien i Baeyens, 2018).

Ukupno gledano, rezultati ove analize upućuju na to da je proksimalno-distalni redoslijed aktivacije segmenata kinetičkog lanca u vrhunskih rukometaša stabilna i relativno neosjetljiva koordinacijska značajka bacačke tehnike, što je sukladno teorijskim okvirima dinamičkih sustava koordinacije i kontrole (Serrien i Baeyens, 2018). Umor narušava apsolutne vrijednosti brzina u pojedinim segmentima – posebno u ramenom pojasu – ali ne remeti temeljni redoslijed prijenosa kinetičke energije. Maleno produženje vremenskih razmaka u proksimalnom dijelu lanca (natkoljenica →

rame, rame → nadlaktica) može se interpretirati kao pokazatelj umjerenog umora specifičnih mišićnih skupina koje sudjeluju u prijenosu sile između donjih i gornjih ekstremiteta, bez dezorganizacije cjelovite koordinacijske topologije bacačkog gibanja.

Uz skupne statističke pokazatelje, posebno je analitički vrijedna distribucija individualnih obrazaca promjene kinematičkih i izvedbenih varijabli pod opterećenjem prikazana u Tablici 4.20. Jedina varijabla koja pokazuje potpuno konzistentan negativni trend jest brzina lopte – svih 20 ispitanika bilježi pad (srednji pad: -3,1 %; najveći pad: -14,6 %), što potvrđuje da je smanjenje brzine lopte pod visokim fiziološkim opterećenjem jedinstven i neselektivan učinak zamora u ovom uzorku. Gotovo jednako konzistentan obrazac pokazuje brzina natkoljenice zamašne noge (17/20 ispitanika bilježi pad; srednji pad: -8,0 %; najveći pad: -31,1 %), što tu varijablu izdvaja kao najdosljedniji kinematički pokazatelj učinka umora u donjem dijelu kinetičkog lanca.

Nasuprot tomu, varijable poput brzine potkoljenice (Potk_Vmax), nadlaktice (Nadl_Vmax) i podlaktice (Podl_Vmax) pokazuju gotovo podjednaku raspodjelu padova i porasta, što potvrđuje da je kod tih segmenata pod opterećenjem prisutna individualno specifična reorganizacija koordinacijskih obrazaca, a ne uniformni učinak umora. Posebno je indikativan slučaj brzine potkoljenice, gdje 12 od 20 ispitanika bilježi porast vrijednosti (srednji porast: +8,5 %; najveći porast: +38,5 %), što se tumači kao kompenzacijski mehanizam kojim smanjena brzina natkoljenice biva djelomično nadoknađena pojačanom aktivacijom distalnijeg segmenta. Navedeni nalaz konzistentan je s kompenzacijskim modelima kinetičkog lanca opisanima u literaturi, prema kojima umor u jednom segmentu ne nužno rezultira proporcionalnim padom u cijelom lancu, već može potaknuti reorganizaciju doprinosa pojedinih segmenata ukupnoj brzini šake (Plummer i Oliver, 2016).

Preciznost šuta pokazuje najveću interindividualnu varijabilnost od svih analiziranih varijabli: 13 ispitanika bilježi smanjenje odstupanja od ciljane točke (poboljšanje preciznosti; srednji pad: -34,1 %; najveći pad: -67,8 %), dok 7 ispitanika bilježi povećanje odstupanja (pogoršanje preciznosti; srednji porast: +71,2 %; najveći porast: +177,5 %). Ta iznimna raspršenost individualnih odgovora potvrđuje da skupna srednja vrijednost pokazatelja preciznosti ne opisuje adekvatno stvarne izvedbene obrasce te da je individualna analiza neophodan komplement skupnoj statistici pri interpretaciji učinka umora na preciznost šuta. Navedeni nalazi u skladu su sa zaključcima Nuña i suradnika (2016), koji naglašavaju da individualne razlike u

tehničkim i fiziološkim karakteristikama igrača znatno moduliraju veličinu i smjer promjena preciznosti pod umorom.

Analiza postotnih promjena deset statistički značajnih kinematičkih i izvedbenih varijabli prema igračkim pozicijama (Tablica 4.22.) otkriva niz obrazaca koji dopunjuju skupnu statističku sliku i pružaju uvid u pozicijsko-specifične mehanizme prilagodbe skok šuta na visoko fiziološko opterećenje.

Brzina zdjelice u fazi zaleta (Pelvis_Vmax) pada podjednako kod svih triju skupina (vanjski: -3,2 %; krilni: -3,0 %; kružni: -3,0 %), uz gotovo identičnu standardnu devijaciju kod krilnih i kružnih igrača ($\pm 0,9$ % i $\pm 2,3$ %), što upućuje na to da je inicijalni impuls zaleta podjednako osjetljiv na umor neovisno o igračkoj poziciji te da se radi o uniformnom učinku visokog metaboličkog opterećenja na horizontalni impuls zaleta. Nasuprot tomu, brzina natkoljenice odrazne noge (Natk_Vmax) pokazuje izrazit pozicijski obrazac: kružni napadači bilježe najveći pad (-8,8 % $\pm$ 9,4 %), znatno veći od pada kod krilnih igrača (-3,5 % $\pm$ 3,2 %), dok vanjski igrači pokazuju srednje vrijednosti (-5,6 % $\pm$ 12,0%) uz visoku individualnu varijabilnost. Ovakav nalaz konzistentan je s morfološkim karakteristikama kružnih napadača u uzorku (prosječna tjelesna masa 99,4 kg), čija veća tjelesna masa povećava mehaničko opterećenje odrazne noge i može ubrzati zamor miškulature odgovorne za generiranje zamaha natkoljenice u odrazu.

Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom (Tkont) produljuje se kod svih triju pozicija (vanjski: +1,4 %; krilni: +3,3 %; kružni: +1,4 %), pri čemu krilni igrači bilježe nešto veće produljenje. Međutim, razlike su male i uz visoku standardnu devijaciju unutar svake skupine ne dopuštaju čvrste zaključke.

Najizraženiji pozicijski obrazac zabilježen je za kutnu brzinu ramenog zgloba šuterske ruke (Rame_AVmax): krilni igrači bilježe daleko najveći pad (-34,6 % $\pm$ 14,2 %), što je znatno više od pada kružnih napadača (-18,3 % $\pm$ 25,6 %) i posebno od vanjskih igrača (-2,2 % $\pm$ 32,0 %). Ovaj nalaz posebno je analitički vrijedan iz dvaju razloga. Prvo, krilni igrači u igri tipično izvode skok šut iz dinamičnih situacija s promjenom smjera, u nepovoljnim kutovima i često pod visokim stupnjem taktičkog i fizičkog opterećenja, što može rezultirati većim dugotrajnim opterećenjem miškulature ramenog pojasa tijekom utakmice. Drugo, visoka standardna devijacija u vanjskih igrača ($\pm 32,0$ %) upućuje na to da unutar te najbrojnije skupine postoje izražene individualne razlike – neki vanjski igrači pokazuju izrazit pad kutne brzine ramena pod

opterećenjem, dok drugi ne – što može odražavati heterogenost šuterskih strategija, ali i razliku u razini tehničko–taktičke kvalitete unutar iste igračke pozicije.

Linearna brzina ramena šuterske ruke (Rame_Vmax) pokazuje zanimljiv suprotan obrazac: krilni igrači bilježe blagi porast (+4,3 % ± 8,3 %), dok vanjski i kružni napadači bilježe pad (-5,8 % i -2,9 %). Navedeni paradoks – istovremeni pad kutne brzine ramena i porast linearne brzine ramena kod krilnih igrača – može se protumačiti kompenzacijskim povećanjem translacijske brzine ramena pri smanjenoj rotacijskoj aktivnosti, što je vjerojatno posljedica tehničke reorganizacije šuta pod opterećenjem specifične za tu poziciju.

Kutna brzina ručnog zgloba šuterske ruke (Ručni_AVmax) pokazuje obrazac rastuće promjene od vanjskih prema kružnim napadačima: vanjski igrači bilježe blagi skupni porast (+3,0 %), dok krilni (-10,6 %) i kružni napadači (-17,7 %) bilježe pad. Iznimno visoka standardna devijacija vanjskih igrača (±61,5 %) još jednom potvrđuje heterogenost unutar te skupine. Brzina šake (Šaka_Vmax) i visina šake šuterske ruke pri izbačaju (Šaka_VIS) padaju konzistentno kod svih pozicija, pri čemu kružni napadači bilježe najmanji pad brzine šake (-0,3 %) – što je u skladu s njihovom tehnikom šuta s kraće udaljenosti, koja je manje ovisna o maksimalnoj distalnoj brzini kinetičkog lanca.

Visina skoka pokazuje najizraženiji pozicijski obrazac u cijeloj analizi: kružni napadači bilježe daleko najveći pad (-10,7 % ± 5,6 %), nasuprot minimalnim promjenama kod vanjskih (-1,5 %) i krilnih igrača (-2,0 %). S obzirom na veću tjelesnu masu kružnih napadača, veći pad visine skoka nije neočekivan – veća tjelesna masa zahtijeva veći mehanički rad pri odrazu, što je pod opterećenjem znatno otežano, a dodatno valja imati na umu da kružni napadači u natjecateljskim uvjetima rjeđe izvode skok šut preko visokog bloka, pa se njihova tehnika šuta u većoj mjeri oslanja na šut iz relativno nižih skokova i kraćih udaljenosti. Brzina lopte dosljedno pada kod svih triju pozicija (vanjski: -3,5 %; krilni: -2,7 %; kružni: -2,0 %), pri čemu kružni napadači bilježe najmanji pad, vjerojatno zbog konzervativnije tehnike šuta s kraće udaljenosti, koja je manje osjetljiva na pad distalnih brzina kinetičkog lanca.

Navedeni pozicijski obrasci, premda temeljeni na relativno malom uzorku po skupini i bez statističke provjere razlika između pozicija, imaju jasne implikacije za trenažnu praksu. Kod krilnih igrača rezultati ukazuju na izražen pad kutne brzine ramena pod opterećenjem, što sugerira potrebu naglašavanja razvoja specifične lokalne mišićne izdržljivosti i otpornosti ramenog pojasa na ponavljane eksplozivne

šuterske pokrete, u skladu s njihovom tehničko–taktičkom ulogom. Kod kružnih napadača veći pad visine skoka pod opterećenjem treba tumačiti u kontekstu njihove veće tjelesne mase i specifične tehničko–taktičke uloge (završnica iz kontakta i s kraće udaljenosti), pa se trenažni naglasak više treba usmjeriti na očuvanje eksplozivnosti odrazne noge u uvjetima kontakta i opterećenja, nego na povećanje same visine skoka. Kod vanjskih igrača, zbog visoke varijabilnosti unutar grupe, preporuča se individualizirani pristup praćenju kinematičkih promjena pod opterećenjem, uz uvažavanje razlika u šuterskim strategijama i razini tehničko–taktičke kvalitete unutar iste pozicije.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata i postavljenih hipoteza može se zaključiti sljedeće:

Prva hipoteza (H1), koja pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u kinematičkim parametrima gornjeg dijela kinetičkog lanca, prihvaća se. Statistički značajan pad zabilježen je u kutnim brzinama ramena i ručnog zgloba te u linearnoj brzini šake u fazi leta i izbačaja, dok je kutna brzina lakta ostala bez značajne promjene, uz blagi porast koji se može tumačiti kao kompenzacijski mehanizam unutar kinetičkog lanca. Najizraženije promjene zabilježene su u fazi leta i izbačaja, u kojima je kutna brzina ramena pala za 16,0 %, a kutna brzina ručnog zgloba za 11,4 %. Brzina šake u trenutku izbačaja smanjila se za 3,1 %, a visina šake pri izbačaju bila je niža za prosječno 3,7 cm. Kutna brzina lakta ostala je relativno stabilna (+2,2 %), što se tumači kao kompenzacijski mehanizam unutar kinetičkog lanca.

Druga hipoteza (H2), koja pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u kinematičkim parametrima donjeg dijela kinetičkog lanca, prihvaća se djelomično, budući da su značajne promjene zabilježene u brzini zdjelice, brzini natkoljenice odrazne noge i trajanju kontakta odraznog stopala, dok su ostali analizirani parametri donjih ekstremiteta ostali stabilni. U fazi zaleta zabilježen je pad maksimalne linearne brzine zdjelice od 3,3%. U fazi odraza najdosljedniji negativni trend pokazala je linearna brzina natkoljenice odrazne noge (-6,4%), pri čemu je 16 od 20 ispitanika zabilježilo pad. Kutna brzina koljena odrazne noge pala je za 3,1%, dok su kutne brzine gležnja i kuka te linearna brzina potkoljenice odrazne noge ostale stabilne ili su blago porasle, što upućuje na kompenzacijsku aktivaciju proksimalnih i distalnih zglobova za gubitak u segmentima natkoljenice i koljena. Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom povećalo se za 1,7%, pri čemu je 12 od 20 ispitanika bilježilo produljenje. Kutovi zamašne noge u kuku i koljenu ostali su gotovo nepromijenjeni, što upućuje na to da je prostorna organizacija skok šuta u donjem dijelu tijela relativno očuvana unatoč smanjenoj brzinskoj učinkovitosti.

Treća hipoteza (H3), koja pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u brzini izbačaja lopte, prihvaća se. Prosječna brzina lopte smanjila se sa $89,5 \pm 7,0$ km/h na $86,7 \pm 6,9$ km/h, što odgovara padu od 3,1 %. Pad je konzistentan – zabilježen je kod 17 od 20 ispitanika – i može se biomehanički povezati s kumulativnim

slabljem kinetičkog lanca u prethodnim fazama, osobito s padom kutnih brzina ramena i ručnog zgloba te smanjenom brzinom šake pri izbačaju.

Četvrta hipoteza (H4), koja pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u trajanju kontakta odraznog stopala s podlogom, prihvaća se. Trajanje kontakta odraznog stopala s podlogom povećalo se s $200,4 \pm 19,4$ ms na $203,8 \pm 20,6$ ms (+1,7 %), pri čemu je 12 od 20 ispitanika zabilježilo produljenje. Navedeni nalaz upućuje na smanjenu eksplozivnu reaktivnu snagu odrazne noge pod opterećenjem: igraču je potrebno više vremena kako bi generirao impuls odraza jednakog intenziteta, što je u skladu s poznatim učincima visokog metaboličkog opterećenja na kapacitet razvoja sile u mišićima donjih ekstremiteta.

Peta hipoteza (H5), koja pretpostavlja postojanje statistički značajnih razlika u preciznosti šutiranja, prihvaća se, ali s napomenom da je smjer promjene suprotan od očekivanog. Prosječno odstupanje lopte od centra cilja smanjilo se sa $41,3 \pm 31,3$ cm na $33,9 \pm 27,5$ cm, što odgovara poboljšanju od 17,8 % na skupnoj razini. Navedeni paradoksalni nalaz tumači se kompromisnim odnosom između brzine i preciznosti bacačkog gibanja: smanjenje brzine lopte pod opterećenjem praćeno je povećanom pažnjom prema ciljanju i kontroliranijom tehničkom izvedbom.

Rezultati analize proksimalno–distalnog redoslijeda aktivacije pokazali su da je ispravan redoslijed – od natkoljenice prema ramenu, nadlaktici, podlaktici i šaci – bio očuvan u oba uvjeta mjerenja, prije i nakon opterećenja. Sve izmjerene vrijednosti vremenskih razmaka između susjednih segmenata bile su pozitivne, što potvrđuje da visoko fiziološko opterećenje nije narušilo temeljni proksimalno–distalni koordinacijski obrazac skok šuta. Uočeno je malo produženje vremenskih razmaka u proksimalnom dijelu lanca – osobito u prijelazima natkoljenica → rame (+14,5 ms) i rame → nadlaktica (+11,5 ms) – što se tumači kao pokazatelj blagog umora mišićne trupa i ramenog pojasa, bez remećenja cjelovitog obrasca prijenosa kinetičke energije.

Ukupno gledano, rezultati ovog istraživanja pokazuju da visoko fiziološko opterećenje uzrokuje mjerljive promjene u kinematičkim parametrima skok šuta na svim razinama kinetičkog lanca – od brzine zdjelice u fazi zaleta do brzine lopte pri izbačaju – ali ne narušava temeljnu koordinacijsku strukturu gibanja. Ispitanici su pod opterećenjem zadržali prepoznatljiv obrazac skok šuta, prilagođavajući ga smanjivanjem apsolutnih brzina i reorganizacijom pojedinih segmenata, dok je temeljni proksimalno–distalni mehanizam prijenosa kinetičke energije ostao očuvan. Dobiveni rezultati potvrđuju da je skok šut u rukometu koordinacijski stabilan tehnički element

čija se učinkovitost pod opterećenjem smanjuje, ali čija temeljna mehanička organizacija nije narušena.

Ovo istraživanje pruža detaljan uvid u selektivna djelovanja umora na kinematičku strukturu skok šuta u rukometu, pri čemu se po prvi put u jedinstvenom modelu integriraju segmentarne brzine, proksimalno-distalni vremenski slijed i izvedbeni ishodi (brzina lopte i preciznost šuta) u uvjetima visokog fiziološkog opterećenja. Time se nadograđuju postojeća istraživanja, koja su učinke umora najčešće promatrala izolirano na razini pojedinih zglobova ili isključivo kroz promjene brzine šuta, bez povezivanja s očuvanjem koordinacijskog obrasca kinetičkog lanca. Dobiveni nalazi imaju izravnu praktičnu vrijednost za trenažni proces, jer upućuju na potrebu ciljane stabilizacije ramenog kompleksa i odrazne noge u uvjetima umora te na uvažavanje kompromisnog odnosa između brzine i preciznosti šuta pri planiranju opterećenja i modeliranju završnice napada.

LITERATURA

1. Akter, S., Shanta, Ajita. (2025). The effect of endurance training on blood lactate concentration and anaerobic threshold in Bangladeshi female handball athletes. *Theory and Methods of Physical Education*, 25(1).
<https://doi.org/10.17309/tmfv.2025.1.12>
2. Akyüz, B., Arpinar Avşar, P., Bilge, M., Deliceoğlu, G., & Korkusuz, F. (2019). Skeletal muscle fatigue does not affect shooting accuracy of handball players. *Isokinetics and Exercise Science*, 27(4), 1–6.
<https://doi.org/10.3233/IES-193178>
3. Ament, W., Verkerke, G. J. (2009). Exercise and fatigue. *Sports Medicine*, 39(5), 389–422. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939050-00005>
4. Baldinger, M., Lippmann, K., Senner, V. (2024). Artificial intelligence-based motion capture: Current technologies, applications and challenges. In *Artificial Intelligence in Sports, Movement, and Health* (pp. 161–176). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-67256-9_10
5. Bauer, J., Hagen, M., Weisz, N., Muehlbauer, T. (2020). The influence of fatigue on throwing and YBT-UQ performance in male adolescent handball players. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, 81.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00081>
6. Bauer, J., Muehlbauer, T., Geiger, S., Gruber, M., (2024). Interaction between the leg recovery test and subjective measures of fatigue in handball players: Short-, mid-, and long-term assessment. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1474385. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1474385>
7. Bedo, B. L. S., Catelli, D. S., Lamontagne, M., Moraes, R., Pereira, D. R., Graça, J. B., Santiago, P. R. P. (2022). Fatigue modifies hip and knee kinematics during single- and double-leg dynamic tasks: An investigation with female handball players. *Journal of Sports Sciences*, 40(17), 1964–1972. <https://doi.org/10.1080/02640414.2022.2123506>
8. Belcic, I., Rodić, S., Dukarić, V., Rupčić, T., Knjaz, D. (2021). Do blood lactate levels affect the kinematic patterns of jump shots in handball? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10809. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010809>

9. Bojić-Ćaćić, L. (ur.) (2020). Rukomet u 21. stoljeću: Suvremeni pristup treniranju rukometa. Zagreb: Hrvatska olimpijska akademija.
10. Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377–381.
11. Buchheit M. (2008). The 30-15 intermittent fitness test: accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *Journal of strength and conditioning research*, 22 (2), 365–374.
DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181635b2e
12. Burger, A. (2016). Kinematičko i ekspertno modeliranje odabranih elemenata tehnike u rukometu [Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu]. Kineziološki fakultet u Splitu
13. Burger, A., Foretić, N., Rogulj, N. (2026). Performance indicators in elite Croatian women's handball: A longitudinal analysis. *Sport Mont*, 24(4), 1–10.
DOI: 10.26773/smj.260204
14. Cecere, R. A., Fury, M. S., Lipkens, N. R., Williams, A. B., Matzko, N. E., White, H. N., Lama, J., Moran, J., Fealy, S., Dines, J. S., Gulotta, L., Kontaxis, A. (2025). Increasing pitch count is associated with increasing elbow flexion angle at ball release in youth baseball pitchers. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 34(2), 550-556. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2024.05.050>
15. Cordeiro, L. M. S., Rabelo, P. C. R., Moraes, M. M., Teixeira-Coelho, F., Coimbra, C. C., Wanner, S. P., Soares, D. D. (2017). Physical exercise-induced fatigue: The role of serotonergic and dopaminergic systems. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 50(12), e6432.
<https://doi.org/10.1590/1414-431X20176432>
16. Crotty, N. M., Boland, M., Mahony, N., Donne, B., Fleming, N. (2021). Reliability and validity of the Lactate Pro 2 analyzer. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1080/1091367X.2020.1865966>
17. Cherif, M., Chtourou, H., Souissi, N., Aouidet, A., Chamari, K. (2016). Maximal power training induced different improvement in throwing velocity and muscle strength according to playing positions in elite male handball players. *Biology of Sport*, 33(4), 393–398. <https://doi.org/10.5604/20831862.1224096>
18. Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Routledge.

19. Dello Iacono, A., Eliakim, A., Meckel, Y. (2015). Improving fitness of elite handball players: Small-sided games vs. repeated shuffle sprints. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(8), 2109–2116.
[DOI: 10.1519/JSC.0000000000000686](https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000686)
20. Enoka, R. M., Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function. *Journal of Physiology*, 586(1), 11-23.
doi: [10.1113/jphysiol.2007.139477](https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.139477)
21. Enoka, R. M., Duchateau, J. (2016). Translating fatigue to human performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11), 2228-2238
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929>
22. Eriksrud, O., Sæland, F. O., Federolf, P. A., Cabri, J. (2019). Functional mobility and dynamic postural control predict overhead handball throwing performance in elite female team handball players. *Journal of Sports Science and Medicine*, 18(1), 91–100.
23. Ferrari, W., Dias, G., Sousa, T., Sarmento, H., Vaz, V. (2020). Comparative analysis of the offensive effectiveness in winner and losing handball teams. *Frontiers in Psychology*, 11, 547110.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.547110>
24. Foley, T. E., Fleshner, M. (2008). Neuroplasticity of dopamine circuits after exercise: Implications for central fatigue. *Neuromolecular Medicine*, 10(2), 67-79.
<https://doi.org/10.1007/s12017-008-8032-3>
25. Foretić, N., Rogulj, N., & Trninić, M. (2010). The influence of situation efficiency on the result of a handball match. *Sport Science*, 3(2), 45–51.
26. Gabrys, T., Stanula, A., Gupta, S., Szmatlan-Gabrys, U., Benešová, D., Wicha, Ł., Baron, J. (2020). A comparative study on the performance profile of under-17 and under-19 handball players trained in the sports school system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 7979.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17217979>
27. Garcés-Leal, A., Díez-Vega, I., Molano-Mazuera, J. I., Martínez-González-Moro, I. (2016). Effects of fatigue on throwing performance in experienced team handball players. *Journal of Human Kinetics*, 54, 103–114, DOI: 10.1515/hukin-2016-0039
28. García-Buendía, G., Martínez-García, D., Jerez-Mayorga, D., Gómez-López, M., Chiroso-Ríos, I. J., Chiroso-Ríos, L. J. (2022). Exploration of the shoulder internal

- rotation's influence on throwing velocity in handball players: A pilot study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15923.
<https://doi.org/10.3390/ijerph192315923>
29. García-Sánchez, C., Navarro, R. M., Karcher, C., de la Rubia, A. (2023). Physical demands during official competitions in elite handball: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20, 3353.
<https://doi.org/10.3390/ijerph20043353>
 30. González-García, I., Casáis Martínez, L. (2023). Analysis of the effectiveness of the offensive game model in elite handball. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 45(3), 30–46.
<https://doi.org/DOI:10.36386/sajrsper.v45i3.128>
 31. Glatthorn, J. F., Gouge, S., Nussbaumer, S., Stauffacher, S., Impellizzeri, F. M., Maffiuletti, N. A. (2011). Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height. *Journal of strength and conditioning research*, 25(2), 556–560.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ccb18d>
 32. Habay, J., Uyenbroeck, R., Van Droogenbroeck, R., De Wachter, J., Proost, M., Tassignon, B., De Pauw, K., Pattyn, N., Van Cutsem, J., Roelands, B. (2023). Interindividual variability in mental fatigue-related impairments in endurance performance: A systematic review and multiple meta-regression. *Sports Medicine – Open*, 9(14).
<https://doi.org/10.1186/s40798-023-00559-7>
 33. Hadjisavvas, S., Efstathiou, M. A., Themistocleous, I.-C., Daskalaki, K., Malliou, P., Giannaki, C. D., Lewis, J., Stefanakis, M. (2024). Effect of concentric exercise-induced fatigue on proprioception, motor control and performance of the upper limb in handball players. *PLOS ONE*, 19(12), e0315103.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315103>
 34. Hermassi, S., Chelly, M. S., Fathloun, M., Shephard, R. J. (2010). The effect of heavy vs. moderate load training on the development of strength, power, and throwing velocity in male handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2408–2418. DOI: 10.1519/JSC.0b013e3181e58d7c

35. Hermassi, S., Chelly, M. S., Fieseler, G., Bartels, T., Schulze, S., Delank, K. S., Chamari, K. (2011). Effects of 8-week in-season upper and lower limb heavy resistance training on the peak power, throwing velocity, and sprint performance of elite male handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2424–2433.
36. Hinz, M., Lehmann, N., Aye, N., Melcher, K., Tolentino-Castro, J. W., Wagner, H., Taubert, M. (2022). Differences in decision-making behavior between elite and amateur team-handball players in a near-game test situation. *Frontiers in Psychology*, 13, 854208.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.854208>
37. Huang, T., Liang, Z., Wang, K., Miao, X., Zheng, L. (2025). Novel insights into athlete physical recovery concerning lactate metabolism, lactate clearance and fatigue monitoring: A comprehensive review. *Frontiers in Physiology*, 16, 1459717.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1459717>
38. Jalalifar, N., Pashabadi, A., Mohammadi, F. (2022). The effect of different levels of mental fatigue on the performance of throwing of skilled handball players. *Journal of Motor Control and Learning*, 4(4), 7-12.
39. Jensen, M. T., Wod, M., Galatius, S., Hjelmberg, J. B., Jensen, G. B., Christensen, K. (2017). Heritability of resting heart rate and association with mortality in middle-aged and elderly twins. *Heart*, 104(1), 30–36.
<https://doi.org/10.1136/heartjnl-2016-310986>
40. Jung, Y., Kang, D., Kim, J. (2010). Upper body motion tracking with inertial sensors. U zborniku radova: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (str. 1746–1750). IEEE.
41. Kaufmann, S., Beneke, R., Latzel, R., Pfister, H., Hoos, O. (2021). Metabolic profiles of the 30-15 intermittent fitness test and the corresponding continuous version in team-sport athletes—Elucidating the role of inter-effort recovery. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(11), 1634–1642.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0761>
42. Karcher, C., Buchheit, M. (2014). On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions. *Sports Medicine*, 44(6), 797–814.
<https://doi.org/10.1007/s40279-014-0164-z>

43. Krawczyk, P., Kupczak, A., Pergo, J., Hejnosz, A. J. (2025). Performance analysis in won and lost matches and the predictors of goal difference and match outcome in women's Handball European Championship 2022. *Scientific Reports*, 15, 15505. DOI: 10.1038/s41598-025-00699-8
44. Khalaji, M., Dehkordi, P. S., Mousavian, F., Alboghebeish, S. (2025). Comparative analysis of mental and physical fatigue on motor coordination, visual search patterns, perceived effort, and performance outcomes in closed-loop aiming task. *PLOS ONE*, 20(7), e0324063.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324063>
45. Khalifa, A., Obaid, M.A., Hadi, Z.A. (2025). Motor response time and biomechanical factors in stationary handball shooting accuracy among University players. *Annals of Applied Sport Science*, 13(4), 1577
46. Kim, K., Kim, H., Song, K., Yoon, S., Hong, E. J., Jeon, H. G., Oh, K. U., & Lee, S. Y. (2024). Effects of functional fatigue protocol and visual information on postural control in patients with chronic ankle instability. *Applied Sciences*, 14(11), 4445.
<https://doi.org/10.3390/app14114445>
47. Klatt, S., Kossmann, M., Hottenrott, L., Ferrauti, A., Fasold, F. (2021). Performance changes and recovery time in U20 and older handball players after a high-intensity sprint exercise. *Applied Sciences*, 11(11), 5301.
<https://doi.org/10.3390/APP11115301>
48. Kudzia, P., Wakeling, J. M., Robinovitch, S. N., Donelan, J. M. (2025). Neuromuscular fatigue reduces force responsiveness when controlling leg external forces. *Physiological Reports*, 13(16), e70498.
<https://doi.org/10.14814/phy2.70498>
49. Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4, 863.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
50. Li, S., Luo, Y., Cao, Y., Li, F., Jin, H., Mi, J. (2025). Changes in shooting accuracy among basketball players under fatigue: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, 16, Article 1435810.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1435810>

51. Linke, D., Link, D., Lames, M. (2018). Validation of electronic performance and tracking systems (EPTS) under field conditions. *PLOS ONE*, 13(7), e0199519.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199519>
52. Luteberget, L. S., Jølstad, P. A. H., Gilgien, M. (2023). Methods to assess validity of positioning systems in team sports: Can we do better? *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 9(1), e001496.
<https://doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001496>
53. Mangin, T., Audiffren, M., Lorcery, A., Mirabelli, F., Benraiss, A., André, N. (2022). A plausible link between the time-on-task effect and the sequential task effect. *Frontiers in Psychology*, 13, Article 998393.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.998393>
54. Marin, M. I., Robert, S., Sakizlian, R. E., Rusu, L., Rusu, R. M. (2024). A biomechanical evaluation of the upper limb kinematic parameters of the throwing action in handball: A case study. *Applied Sciences*, 14, 667.
<https://doi.org/10.3390/app14020667>
55. Martins, F., França, C., Sarmiento, H., Przednowek, K., Śliż, M., Campos, P., Lopes, H., Marques, A., Gouveia, E. R. (2024). Analyzing the effects of competitive fatigue on body composition and functional capacities of youth elite handball players. *Montenegrin Journal of Sports Science and Medicine*, 20(2), 71-77
<https://doi.org/10.26773/mjssm.240909>
56. Meletakos, P., Noutsos, K., Paulo, A., Papavasileiou, A., Drikos, S. (2025). Identifying performance indicators for success in the European men's handball championships. *Journal of Physical Education and Sport*, 25(2), 329–337.
57. Menolotto, M., Komaris, D.-S., Tedesco, S., O'Flynn, B., Walsh, M. (2020). Motion capture technology in industrial applications: A systematic review. *Sensors*, 20(19), 5687.
<https://doi.org/10.3390/s20195687>
58. Michalsik, L. B., Aagaard, P. (2015). Physical demands in elite team handball: Comparisons between male and female players. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(9), 878–891.
59. Michalsik, L. B., Madsen, K., Aagaard, P. (2015). Physiological capacity and physical testing in male elite team handball. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(5), 415–429.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24402441/>

60. Mielniczek, M., Lunde, P., van den Tillaar, R. (2025). Effects of integrating wearable resistance into regular volleyball training on countermovement jump performance and kinematics during the in-season period. *Biomechanics*, 5,75
<https://doi.org/10.3390/biomechanics5040075>
61. Milanović, D., Vuleta, D., Ohnjec, K. (2018). Performance indicators of winning and defeated female handball teams in matches of the 2012 Olympic Games tournament. *Journal of Human Kinetics*, 64, 247–253
62. Milić, V., Radenković, O., Čaprić, I., Mekić, R., Trajković, N., Špirtović, O., Koničanin, A., Bratić, M., Mujanović, R., Preljević, A., Murić, B., Kahrović, I. (2025). Sports Injuries in Basketball, Handball, and Volleyball Players: Systematic Review. *Life*, 15(4), 529.
<https://doi.org/10.3390/life15040529>
63. Moen, F., Myhre, K., Andersen, K. A., Hrozanova, M. (2018). Emotions and performance in elite women handball. *The Sport Journal*, 21, 1–22.
64. Mohorič, U., Šibila, M., & Strumbelj, B. (2021). Positional differences in some physiological parameters obtained by the incremental field endurance test among elite handball players. *Kineziologija*, 53(1), 3–10.
<https://doi.org/10.26582/k.53.1.1>
65. Mohorič, U., Šibila, M., Abazović, E., Jovanović, S., & Paravlic, A. H. (2022). Comparison of the field-based intermittent running fitness test 30–15 and the treadmill multistage incremental test for the assessment of cardiorespiratory fitness in elite handball players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3535.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19063535>
66. Moreno, F. J., Hernández-Davó, J. L., García, J. A., Sabido, R., Urbán, T., & Caballero, C. (2023). Kinematics and performance of team-handball throwing: Effects of age and skill level. *Sports Biomechanics*, 22(10), 1348–1363.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1800072>
67. Mortimer, H., Dallaway, N., & Ring, C. (2024). Effects of isolated and combined mental and physical fatigue on motor skill and endurance exercise performance. *Psychology of Sport and Exercise*, 75, 102720.
<https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2024.102720>

68. Nuno, A., Chiroso, I.J., van den Tillar, R., Guisado, R., Martin, I., Martinez, I., Chiroso, L.J. (2016). Effects of fatigue on throwing performance in experienced team handball players. *Journal of Human Kinetics*, 54, 103–113.
69. Ohnjec, K., Vuleta, D., Milanović, D., & Gruić, I. (2008). Performance indicators of teams at the 2003 World Handball Championship for women in Croatia. *Kinesiology*, 40(1), 69–79.
70. Ohnjec, K., Antekolović, L., & Gruić, I. (2010). Comparison of kinematic parameters of jump shot performance by female handball players of different ages. *Acta Kinesiologica*, 4(2), 33–40.
71. Ohnjec, K., Hećimović, M., & Žindarec Čučković, A. (2021). The throwing velocity at different phases of teaching handball elements. *Acta Kinesiologica*, (N1 2021), 83–87. [DOI: 10.51371/issn.1840-2976.2021.15.1.10](https://doi.org/10.51371/issn.1840-2976.2021.15.1.10)
72. Penichet-Tomás, A. (2024). Applied biomechanics in sports performance, injury prevention, and rehabilitation. *Applied Sciences*, 14(24), 11623. <https://doi.org/10.3390/app142411623>
73. Petruzela, J., Papla, M., Stastny, P. (2023). Conditioning strategies for improving handball throwing velocity: A systematic review and meta-analyses. *Journal of Human Kinetics*, 87, 189–200. [DOI: 10.5114/jhk/162017](https://doi.org/10.5114/jhk/162017)
74. Plummer, H. A., Oliver, G. D. (2015). The effects of aerobic fatigue on jump shot kinematics in team handball players. *Journal of Biomedical Engineering and Informatics*, 2(1), 65–75. <https://doi.org/10.5430/jbei.v2n1p65>
75. Plummer, H. A., Oliver, G. D. (2016). The effects of localised fatigue on upper extremity jump shot kinematics and kinetics in team handball. *Journal of Sports Sciences*, 34, 182-188. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1160143>
76. Plummer, H. A., Gascon, S. S., Oliver, G. D. (2016). Biomechanical comparison of three perceived effort set shots in team handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 80-87. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001475>
77. Pori, P., Bon, M., Sibila, M. (2005). Jump shot performance in team handball: A kinematic model evaluated on the basis of expert modelling. *Kinesiology*, 37(1), 40–49.

78. Póvoas, S. C. A., Seabra, A. F. T., Ascensão, A. A. M. R., Magalhães, J., Soares, J. M. C., Rebelo, A. N. C. (2012). Physical and physiological demands of elite team handball. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(12), 3365-3375.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318248ae44>
79. Póvoas, S. C. A., Castagna, C., Resende, C., Coelho, E. F., Silva, P., Santos, R., Seabra, A., Tamames, J., Lopes, M., Randers, M. B., Krstrup, P. (2017). Physical and physiological demands of recreational team handball for adult untrained men. *BioMed Research International*, 2017, 6204603.
[DOI: 10.1155/2017/6204603](https://doi.org/10.1155/2017/6204603)
80. Povoas, S. C. A., Seabra, A., Ascensão, A., Magalhães, J., Soares, J., Rebelo, A. N. (2016). Effect of fatigue caused by a simulated handball game on ball throwing velocity, shoulder muscle strength and balance ratio: A prospective study. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 8, 13.
[doi: 10.1186/s13102-016-0038-9](https://doi.org/10.1186/s13102-016-0038-9)
81. Rivilla-García, J., Grande, I., Sampedro, J., van den Tillaar, R. (2011). Influence of opposition on ball velocity in the handball jump throw. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(3), 534–539.
82. Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., Plamondon, A. (2017). Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis. *Medical & biological engineering & computing*, 55 (4), 609–619.
[DOI: 10.1007/s11517-016-1537-2](https://doi.org/10.1007/s11517-016-1537-2)
83. Rogulj, N., Srhoj, V., Srhoj, L. (2004). The contribution of collective attack tactics in differentiating handball score efficiency. *Collegium Antropologicum*, 28, 739–746.
84. Rogulj, N. (2021). *Teorija i metodika rukometa* (ur. M. Čavala; Manualia Universitatis studiorum Spalatensis). Split: Kineziološki fakultet Sveučilišta u Splitu.
85. Saw, A. E., Main, L. C., Gustin, P. B. (2016). Monitoring the athlete training response: Subjective self-report measures outperform commonly used objective measures. *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 281–291.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094758>

86. Schaffarczyk, M., Rogers, B., Reer, R., Gronwald, T. (2022). Validity of the Polar H10 sensor for heart rate variability analysis during resting state and incremental exercise in recreational men and women. *Sensors*, 22(17), 6536.
<https://doi.org/10.3390/s22176536>
87. Schepers, M.; Giuberti, M.; Bellusci, G. (2018). Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing. *Xsens Technology*, 1–8,
[doi: 10.13140/RG.2.2.22099.07205](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22099.07205).
88. Schmidt, R. A., Lee, T. D. (2011). Motor control and learning: A behavioral emphasis (5th ed.). *Human Kinetics*.
<https://psycnet.apa.org/record/2011-15560-000>
89. Schorer, J., Heibült, N., Wilson, S. G., Loffing, F. (2021). Sleep facilitates anticipation training of a handball goalkeeping task in novices. *Psychology of Sport and Exercise*, 53, 101841.
<https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101841>
90. Seipp, D., Feuerbacher, J. F., Jacobs, M. W., Dragutinovic, B., Schumann, M. (2022). Acute effects of high-intensity interval running on lower-body and upper-body explosive strength and throwing velocity in handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(11), 3167–3172.
[DOI: 10.1519/JSC.00000000000004310](https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000004310)
91. Serrien, B., Baeyens, J.-P. (2018). Systematic review and meta-analysis on proximal-to-distal sequencing in team handball: Prospects for talent detection? *Journal of Human Kinetics*, 63, 9–21.
<https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0002>
92. Shumway-Cook, A., Woollacott, M. H. (2017). Motor control: Translating research into clinical practice (5th ed.) Wolters Kluwer.
93. Skejød, S. D., Møller, M., Bencke, J., Sørensen, H. (2019). Shoulder kinematics and kinetics of team handball throwing: A scoping review. *Human Movement Science*, 64, 203–212.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.006>
94. Sporiš, G., Vučetić, V., Milanović, L., Milanović, Z., Krespi, M., Krakan, I. (2014). A comparison anaerobic endurance capacity in elite soccer, handball and basketball players. *Kineziologija*, 46(1), 52–59.
<https://hrcak.srce.hr/127843>

95. Sporiš, G., Vuleta, D., Vuleta, D. Jr., Milanović, D. (2010). Fitness profiling in handball: Physical and physiological characteristics of elite players. *Colligium Antropologicum*, 34(3), 1009–1014.
96. Staiano, W., Sternberg, L. M., Ferri-Caruana, A., Salazar-Bonet, L. R., Romagnoli, M., Henriksen, K., Kirk, U. (2026). Overcoming mental fatigue through mindfulness: Improving physical and cognitive performance in elite handball players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 29(1), 91–99.
<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2025.08.004>
97. Stamford B. A. (1976). Validity and Reliability of Subjective Ratings of Perceived Exertion During Work. *Ergonomics*, 19(1), 53–60.
98. Sun, H., Soh, K. G., Roslan, S., Wazir, M. R. W. N., Soh, K. L. (2021). Does mental fatigue affect skilled performance in athletes? A systematic review. *PLOS ONE*, 16(10), e0258307.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258307>
99. Šibila, M., Pori, P., Bon, M. (2003). Basic kinematic differences between two types of jump shot techniques in handball. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Gymnica*, 33(1).
100. Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. (2013). Using multivariate statistics (6th ed.). Pearson.
101. Tanaka, H., Monahan, K. D., Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153–156.
[https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)01054-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8)
102. Thorlund, J. B., Michalsik, L. B., Madsen, K., Aagaard, P. (2008). Acute fatigue-induced changes in muscle mechanical properties and neuromuscular activity in elite handball players following a handball match. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(4), 462–472.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00710.x>
103. Torabi, T. P., Juul-Kristensen, B., Dam, M., Zebis, M. K., van den Tillaar, R., Bencke, J. (2023). Comparison of throwing kinematics and muscle activation of female elite handball players with and without pain—The effect of repeated maximal throws. *Sports Biomechanics*
<https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2212645>
104. Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A., Clemente-Suárez, V. J. (2022). Central and peripheral fatigue in physical exercise

explained: A narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3909.

<https://doi.org/10.3390/ijerph19073909>

105. Tremblay, M., Anderson Sirois, S., Verville, W., Auger, M., Abboud, J., Descarreaux, M. (2024). Acute upper-body and lower-body neuromuscular fatigue effect on baseball pitchers' velocity: A pilot study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 38(8), 1447–1452.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004822>
106. Trofin, F., Honceriu, C. (2017). Comparative study between Just Jump and Optojump. *Sport and Society: Interdisciplinary Journal of Physical Education and Sports*, 17(2), 53–59.
107. Van den Tillaar, R., Ettema, G. (2004). A force-velocity relationship and coordination patterns in overarm throwing. *Journal of Sports Science & Medicine*, 3(4), 211–219.
108. Van den Tillaar, R., & Ettema, G. (2006). A comparison between novices and experts of the velocity-accuracy trade-off in overarm throwing. *Perceptual and Motor Skills*, 103(2), 503–514.
<https://doi.org/10.2466/pms.103.2.503-514>
109. Van den Tillaar, R., Ettema, G. (2007). A three-dimensional analysis of overarm throwing in experienced handball players. *Journal of Applied Biomechanics*, 23(1), 12–19.
<https://doi.org/10.1123/jab.23.1.12>
110. Van den Tillaar, R., Marques, M. C. (2013). Reliability of seated and standing throwing velocity using differently weighted medicine balls. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(5), 1234–1238.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182654a09>
111. Van den Tillaar, R. (2020). The effects of target location upon throwing velocity and accuracy in experienced female handball players. *Frontiers in Psychology*, 11, 2006.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02006>
112. Van den Tillaar, R., Hope, C. (2023). Effect of difficulty of task on throwing performance and coping strategies in team handball. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1107861.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1107861>

113. Vial, S., Wilkie, J. C., Turner, M., Scanlan, M., Blazevich, A. J. (2023). Does fatigue influence joint-specific work and ground force production during the first steps of maximal acceleration? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 33(6), 894–906.
<https://doi.org/10.1111/sms.14318>
114. Vila, H., Ferragut, C. (2019). Throwing speed in team handball: A systematic review. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 19(4), 1–15.
<https://doi.org/10.1080/24748668.2019.1649344>
115. Zvonarek, N., Vuleta, D. Hraski, Ž. (1997). Kinematička analiza dviju različitih tehnika izvođenja skok-šuta u rukometu. U D. Milanović (ur.), *Zbornik radova 1. međunarodne znanstvene konferencije „Kineziologija – sadašnjost i budućnost“* (str. 180–183). Fakultet za fizičku kulturu Sveučilišta u Zagrebu.
116. Wagner, H., Kainrath, S., Müller, E. (2008) Coordinative and tactical parameters of team-handball throw. The correlation of level of performance, throwing quality and selected technique-tactical parameters. *Leistungssport* 38(5), 35-41.
117. Wagner, H., Buchecker, M., von Duvillard, S. P., Müller, E. (2010). Kinematic description of elite vs. low level players in team-handball jump throw. *Journal of Sports Science and Medicine*, 9(1), 15–23.
118. Wagner, H., Finkenzeller, T., Wurth, S., von Duvillard, S. P. (2011). Performance and kinematics of various throwing techniques in team-handball. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(1), 73–80.
119. Wagner, H., Pfusterschmied, J., von Duvillard, S. P., Müller, E. (2012). Skill-dependent proximal-to-distal sequence in team-handball throwing. *Journal of Sports Sciences*, 30(1), 21–29.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2011.617773>
120. Wagner, H., Finkenzeller, T., Würth, S., von Duvillard, S. P. (2014). Individual and team performance in team-handball: A review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13, 808–816.
121. Wan, J. J., Qin, Z., Wang, P. Y., Sun, Y., Liu, X. (2017). Muscle fatigue: General understanding and treatment. *Experimental & Molecular Medicine*, 49(10), e384.
<https://doi.org/10.1038/emm.2017.194>
122. Williams, N. (2017). The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale. *Occupational Medicine*, 67 (5), 404-405.

123. Wu, C.-H., Zhao, Y.-D., Yin, F.-Q., Yi, Y., Geng, L., Xu, X. (2024). Mental fatigue and sports performance of athletes: Theoretical explanation, influencing factors, and intervention methods. *Behavioral Sciences*, 14(12), 1125. <https://doi.org/10.3390/bs14121125>
124. Yaseen, M. S. (2021). Kinematic variables of elite handball players during throwing from the jump shot position. *Journal of Physical Education and Sport Sciences*, 11(2), 139–151.
125. Yuan, R., Sun, H., Soh, K. G., Mohammadi, A., Toumi, Z., Zhang, Z. (2023). The effects of mental fatigue on sport-specific motor performance among team sport athletes: A systematic scoping review. *Frontiers in Psychology*, 14, 1143618. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1143618>
126. Zhang, J.T., Novak, A.C., Brouwer, B., Qingguo, L. Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiol. Meas.* 2013, 34, N63–N69.

POPIS TABLICA

- Tablica 1.1. Sekvencijalni biomehanički opis pokreta u rukometnom šutu (Wagner i sur., 2010; van den Tillaar i Ettema, 2007)
- Tablica 3.1. Borgova CR-10 skala subjektivnog osjećaja napora (Borg, 1982; prema Williams, 2017).
- Tablica 3.2. Sumarni pregled fizioloških i kinematičkih varijabli
- Tablica 3.3. Prikaz protokola mjerenja po fazama
- Tablica 3.4. Shematski prikaz protokola mjerenja po fazama
- Tablica 4.1. Uzorak ispitanika – morfološke karakteristike
- Tablica 4.2. Uzorak ispitanika – morfološke karakteristike po igračkim pozicijama
- Tablica 4.3. Uzorak ispitanika – antropometrijske karakteristike
- Tablica 4.4. Fiziološki parametri mjereni prije, tijekom i nakon protokola opterećenja
- Tablica 4.5. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi zaleta
- Tablica 4.6. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi odraza
- Tablica 4.7. Sumarni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli svih izmjerenih šutova u fazi leta i izbačaja lopte
- Tablica 4.8. Sumarni deskriptivni pokazatelji svih izmjerenih šutova u završnoj fazi
- Tablica 4.9. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u fazi zaleta
- Tablica 4.10. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u fazi odraza
- Tablica 4.11. Osnovni deskriptivni pokazatelji kinematičkih varijabli parametara šuta prije i nakon protokola iscrpljivanja izmjerenih u fazi leta i izbačaja lopte
- Tablica 4.12. Osnovni deskriptivni pokazatelji varijabli parametara šuta prije i nakon protokola opterećenja izmjerenih u završnoj fazi
- Tablica 4.13. Rezultati t-testa za zavisne uzorke i analize varijance (F-vrijednosti) za brzinu lopte i preciznost šuta prije i nakon protokola opterećenja

- Tablica 4.14. Rezultati Shapiro-Wilk testa normalnosti distribucije i Levenovog testa homogenosti varijanci za kinematičke i izvedbene varijable skok šuta u uvjetima prije i nakon protokola opterećenja
- Tablica 4.15. Rezultati MANOVA-e za ponovljena mjerenja
- Tablica 4.16. Rezultati ANOVA-e za ponovljena mjerenja i veličine učinka (η^2) kinematičkih varijabli parametara skok šuta mjerenih Xsens sustavom
- Tablica 4.17. Kinematičke varijable faze odraza skok šuta prije i poslije opterećenja
- Tablica 4.18. Kinematičke varijable faze leta i izbačaja skok šuta prije i poslije opterećenja
- Tablica 4.19. Vremenski razmaci između postizanja vršnih linearnih brzina susjednih segmenata kinetičkog lanca skok šuta prije i poslije opterećenja
- Tablica 4.20. Rezultati t-testa za zavisne uzorke i veličine učinka (Cohenov d) za izvedbene varijable parametara skok šuta
- Tablica 4.21. Pokazatelji brzine lopte i preciznosti šuta prije i poslije opterećenja
- Tablica 4.22. Individualni obrasci promjene kinematičkih i izvedbenih varijabli šuterske ruke i zamašne noge pod opterećenjem (N = 20)
- Tablica 4.23. Pearsonovi koeficijenti korelacije između vršne koncentracije laktata (30-15_Lak) i prosječne postotne promjene kinematičkih varijabli šuterske ruke i zamašne noge pod opterećenjem (N = 20)
- Tablica 4.24. Postotna promjena ($\Delta = AS \pm SD$) statistički značajnih kinematičkih i izvedbenih varijabli pod opterećenjem prema igračkim pozicijama
- Tablica 4.25. Vremenski razmaci vršnih linearnih brzina segmenata u proksimalno-distalnom redoslijedu prije i poslije opterećenja

POPIS SLIKA

- Slika 3.1. Dob i igračke pozicije ispitanika koji su sudjelovali u istraživanju
- Slika 3.2. Prikaz mjerenih morfoloških varijabli
- Slika 3.3. Kinogram izvedbe skok šuta – faza zaleta
- Slika 3.4. Kinogram izvedbe skok šuta – faza odraza
- Slika 3.5. Kinogram izvedbe skok šuta – faza leta i izbačaja lopte (1)
- Slika 3.6. Kinogram izvedbe skok šuta – faza leta i izbačaja lopte (2)
- Slika 3.7. Senzor za mjerenje kinematičkih parametara i prijenos podataka
- Slika 3.8. Stanica za primanje kinematičkih podataka i prijenos prema računalu
- Slika 3.9. Prikaz pozicija senzora na tijelu ispitanika
- Slika 3.10. Programski prikaz kinematičke analize u *Xsens* sustavu
- Slika 3.11. Grafički prikaz kinematičke analize u *Xsens* sustavu
- Slika 3.12. Prikaz kalibracije sustava tijekom provođenja testiranja
- Slika 3.13. Optojump_next sustav za mjerenje parametara kontakta stopala s podlogom
- Slika 3.14. Prikaz mjernog instrumenata za mjerenje frekvencije srca
- Slika 3.15. Prikaz mjernog instrumenata za mjerenje koncentracije laktata
- Slika 3.16. Prikaz vage (BC-545n) za mjerenje morfoloških karakteristika
- Slika 3.17. Prikaz lopte korištene u testiranju
- Slika 3.18. Prikaz radara kojim se mjerila brzina lopte u testiranju
- Slika 3.19. Prikaz analize preciznosti šuta u *Kinovea* softverskom paketu
- Slika 3.20. Prikaz protokola iscrpljivanja, prema Bucheit (2008)
- Slika 3.21. Prikaz testiranja kinematičkih varijabli
- Slika 3.22. Prikaz kinematičke analize skok šuta sustavom *Xsens Awind*a (*Xsens Technologies B.V.*, Enschede, Nizozemska)
- Slika 4.1. Vršna linearna brzina zdjelice (*Pelvis_Vmax*) u fazi zaleta prije i poslije opterećenja
- Slika 4.2. Vršne kutne brzine zglobova donjih ekstremiteta zamašne noge (kuk, koljeno) i odrazne noge (gležanj) (*AVmax*) u fazi odraza prije i poslije opterećenja
- Slika 4.3. Vrijeme kontakta odraznog stopala s podlogom (*Tkont*) u fazi odraza prije i poslije opterećenja

- Slika 4.4. Vršne linearne brzine segmenata odrazne noge (V_{max}) u fazi odraza prije i poslije opterećenja
- Slika 4.5. Vršne kutne brzine zglobova šuterske ruke (AV_{max}) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja
- Slika 4.6. Vršne linearne brzine segmenata šuterske ruke (V_{max}) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja
- Slika 4.7. Maksimalni kutovi zglobova zamašne noge (A_{max}) u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja
- Slika 4.8. Visine segmenata i prostorni pokazatelji skoka u fazi leta i izbačaja prije i poslije opterećenja
- Slika 4.9. Vršna brzina lopte ($Lopta_V_{max}$) i preciznost šuta (PREC) u završnoj fazi prije i poslije opterećenja
- Slika 4.10. Grafički prikaz rezultata ANOVA-e za ponovljena mjerenja: crveno označene varijable pokazuju statistički značajne razlike ($p < 0.05$) u biomehaničkim parametrima između mjerenja
- Slika 4.11. Grafički prikaz redoslijeda postizanja vršnih linearnih brzina pojedinih segmenata tijela u fazi leta i izbačaja lopte kod skok šuta

ŽIVOTOPIS

Saša Rodić, prof. fizičke kulture i trener rukometa, rođen je 29. siječnja 1979. godine u Jastrebarskom. Srednjoškolsko obrazovanje stekao je u Srednjoj školi Jastrebarsko, smjer Opća gimnazija. Na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirao 2007. godine stekavši zvanje profesora fizičke kulture i trenera rukometa (VSS) pod mentorstvom prof. dr. sc. Saše Jankovića na temu *Ozljede patele u rukometu*. Poslijediplomski studij kineziologije na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu upisuje 2018. godine.

Zaposlen je kao profesor tjelesne i zdravstvene kulture u Srednjoj školi Jastrebarsko, a radio je kao vanjski suradnik iz predmeta Rukomet i predmeta Audiovizualna sredstva u sportu na Kineziološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Aktivno je igrao rukomet te radio kao trener do 2012. godine.

Tijekom profesionalne karijere primio je brojne nagrade i priznanja, nagradu za najbolji stručni rad (2009), nagradu za najbolji znanstveni rad u području primijenjene kineziologije (2011), nagradu za najbolji stručni rad iz područja sportske rekreacije (2022), priznanje istaknutom učitelju za poseban doprinos u školskom sportu srednjih škola Zagrebačke županije (2012, 2022), a 2026. godine je promoviran u stručno zvanje izvrstan savjetnik (AZOO).

Dosad je aktivno sudjelovao na brojnim seminarima, radionicama i međunarodnim konferencijama iz područja kineziologije te u provođenju niza projekata i istraživanja. Autor je i koautor brojnih znanstvenih i stručnih radova koji se bave kinematičkom analizom i dijagnostikom specifičnih motoričkih sposobnosti u rukometu i košarci, biomehaničkom analizom skok šuta, utjecajem umora na kinematičke obrasce šuta, procjenom i razvojem agilnosti, kondicijskom pripremom sportaša, metodikom tjelesne i zdravstvene kulture u osnovnom i srednjem školstvu te programima sportske rekreacije i obuke neplivača.

Popis objavljenih radova

1. Badrić, M., Prskalo, I., Rodić, S. (2009). Spolni dimorfizam u nekim morfološkim karakteristikama i način na koji učenici provode svoje slobodno vrijeme. U I. Prskalo (ur.), *Kineziološka edukacija* (str. 51–63). Učiteljski fakultet.
2. Rodić, S., Lukenda, Ž., Pavlović, Ž., Rupčić, T. (2010). Rukometno kretanje u trokutu – evaluacije testa za procjenu specifične agilnosti kretanja. U *Kondicijska priprema sportaša 2010* (str. 250–255). Kineziološki fakultet.
3. Rodić, S. (2010). Individualiziranom nastavom u susret individualizaciji rada u tjelesnoj i zdravstvenoj kulturi. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 19. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Individualizacija rada u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 373–376). Hrvatski kineziološki savez.
4. Rodić, S., Rupčić, T., Stojković, R., Šlat, D. (2010). Evaluacija programa škole plivanja Ljetne igraonice Jastrebarsko. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 11. Hrvatskog savjetovanja o obuci neplivača* (str. 57–59). Hrvatski savez sportske rekreacije.
5. Baščevan, S., Vučetić, V., Rodić, S. (2010). Usporedba različitih sustava za procjenu tijela. U *Zbornik radova međunarodnog znanstvenog kongresa – Antropološki aspekti sporta, fizičkog vaspitanja i rekreacije* (str. 165–170). Univerzitet Banja Luka.
6. Baščevan, S., Martinčević, I., Rodić, S. (2010). Izokinetički pokazatelji u fazi jačanja muskulature natkoljenice nakon rekonstrukcije LCA – analiza jednog slučaja. U *Zbornik radova međunarodnog znanstvenog kongresa – Antropološki aspekti sporta, fizičkog vaspitanja i rekreacije* (str. 165–170). Univerzitet Banja Luka.
7. Rupčić, T., Matković, B., Knjaz, D., Baščevan, S., Rodić, S. (2011). Differences in anthropological profile of the basketball referees with regards to their chronological age. *Sport Logia*, 7(1), 27–33.
8. Nedić, A., Matković, B., Pavlović, D., Lukenda, Ž., Rodić, S. (2011). Navika pušenja kod sportskih trenera. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 20. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Dijagnostika u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 461–465). Hrvatski kineziološki savez.

9. Rodić, S., Gruić, I., Ohnjec, K. (2011). Validacija mjernog instrumenta za procjenu specifične agilnosti rukometaša. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 20. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Dijagnostika u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 149–156). Hrvatski kineziološki savez.
10. Rodić, S., Gruić, I., Ohnjec, K. (2011). Relacije između bazične i specifične agilnosti u rukometu. U I. Prskalo (ur.), *Zbornik radova 6. Kongresa FIEP-a Europe – Tjelesna i zdravstvena kultura u 21 stoljeću – kompetencije učenika* (str. 668–675). Hrvatski kineziološki savez.
11. Bulava, B., Rodić, S., Gruić, I. (2011). Utjecaj bazičnih i specifičnih motoričkih sposobnosti na preciznost šutiranja u rukometu. U I. Prskalo (ur.), *Zbornik radova 6. Kongresa FIEP-a Europe – Tjelesna i zdravstvena kultura u 21 stoljeću – kompetencije učenika* (str. 558–564). Hrvatski kineziološki savez.
12. Rodić, S., Gruić, I., Ohnjec, K. (2011). Relations between basic and specific agility of younger handball players. In D. Milanović & G. Sporiš (Eds.), *Zbornik radova 6. Međunarodne znanstvene konferencije kineziologije – Integrative power of kinesiology* (pp. 541–546). Kineziološki fakultet.
13. Belčić, I., Marošević, A., Rodić, S. (2011). Effects of unilateral handball training in comparison with effects in sports with dominant bilateral loads in training – differences in motor performance of dominant and nondominant side of the body. In D. Milanović & G. Sporiš (Eds.), *Zbornik radova 6. Međunarodne znanstvene konferencije kineziologije – Integrative power of kinesiology* (pp. 427–430). Kineziološki fakultet.
14. Rodić, S., Rupčić, T., Šlat, D., Stojković, R. (2012). Subjektivna procjena kvalitete programa škole plivanja "Ljetne igraonice" Jastrebarsko. U E. Ružić (ur.), *Zbornik radova 12. Hrvatskog savjetovanja o obuci neplivača – Individualizacija rada u području obuke neplivača* (str. 66–70). Udruga kineziologa grada Rijeke.
15. Knjaz, D., Rodić, S., Rupčić, T., Štimac, D., Tvorek, A., Popek, S. (2012). Provjera znanja o tjelesnom vježbanju, sportu i sportašima učenika 7. i 8. razreda osnovnih škola. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 21. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Intenzifikacija procesa vježbanja u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 435–439). Hrvatski kineziološki savez.

16. Šarić, I., Knjaz, D., Matković, B., Rupčić, T., Rodić, S. (2013). Analiza nastavnih tema iz područja košarkaške igre za 7. i 8. razred prema hrvatskom nacionalnom obrazovnom standardu. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 22. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Organizacijski oblici rada u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 557–564). Hrvatski kineziološki savez.
17. Rodić, S., Knjaz, K., Šunda, M. (2013). Analiza doprinosa pojedinih sportova i sportskih aktivnosti unapređenju zdravstvenog statusa djece srednješkolškog uzrasta. U V. Findak (ur.), *Zbornik radova 22. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Organizacijski oblici rada u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 281–286). Hrvatski kineziološki savez.
18. Rodić, S., Rupčić, T., Očić, M., Bon, I., Dukarić, V. (2018). Usporedba rezultata u testovima agilnosti između perspektivnih mladih košarkaša i definiranje modelnih kinematičkih parametara u promatranim testovima. U V. Babić (ur.), *Zbornik radova 27. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Primjeri dobre prakse u područjima edukacije, sporta, sportske rekreacije i kineziterapije* (str. 490–497). Hrvatski kineziološki savez.
19. Šimunović, D., Knjaz, D., Rupčić, T., Krtalić, S., Rodić, S. (2018). Relationship between certain kinematic parameters during the jump shot and their effect on shooting efficiency in basketball. In D. Škegro (Ed.), *Zbornik radova World congress of performance analysis of sport XII* (pp. 309–314). Faculty of Kinesiology.
20. Cigrovski, V., Bon, I., Očić, M., Rodić, S., Rupčić, T. (2019, November 7–9). *Is teaching basics of alpine ski technique more efficaceous by using exercises based exclusively on an outer ski?* [Conference paper]. 12th International Conference on Kinanthropology, Brno.
21. Rodić, S., Bon, I., Očić, M. (2021). Spolne razlike u promjeni motoričkih i funkcionalnih sposobnosti te potkožnom masnom tkivu nakon 12-tjednog kružnog programa vježbanja. U *Kondicijska priprema sportaša 2021* (str. 94–98). Kineziološki fakultet.
22. Belčić, I., Rodić, S., Dukarić, V., Rupčić, T., & Knjaz, D. (2021). Does blood lactate levels affect the kinematic patterns of jump shots in handball? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10809. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010809>

23. Rodić, S., Kovačić, Ž., Cigrovski, V. (2022). Projekti Ljetne i Zimske igraonice u provedbi Društva naša djeca Jastrebarsko. U G. Leko (ur.), *Zbornik radova 30. Ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske – Kineziologija u Europi – izazovi promjena* (str. 1598–1605). Hrvatski kineziološki savez.
24. Rodić, S., Kovačić, Ž. (2024). Fiziološko opterećenje učenika Srednje škole Jastrebarsko. U G. Leko (ur.), *Zbornik radova 32. međunarodne ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske: Tjelesna pismenost u kineziologiji – karika koja nedostaje* (str. 521–529). Hrvatski kineziološki savez.
25. Cigrovski, V., Očić, M., Bon, I., Čuljak, P., Rodić S., Neljak B. (2026). Razlike u strahu, motivaciji i samoprocjeni skijaške izvedbe između početnika i naprednih rekreativnih skijaša. U G. Leko (ur.), *Zbornik radova 34. međunarodne ljetne škole kineziologa Republike Hrvatske: Inkluzija kroz tjelesnu aktivnot* (str. 955–960). Hrvatski kineziološki savez.